



Evaluación Geotécnica de Materiales Locales de la Región del Vichada para Uso en Carreteras de su Malla Vial Secundaria y Terciaria

Víctor Andrés Gutiérrez Pineda

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá D.C., Colombia
Septiembre 09 de 2019

Evaluación Geotécnica de Materiales Locales de la Región del Vichada para Uso en Carreteras de su Malla Vial Secundaria y Terciaria

Víctor Andrés Gutiérrez Pineda

Trabajo de Grado presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería - Geotecnia

Director (a):
PhD., Carol Andrea Murillo Feo

Línea de Investigación:
Relaciones Constitutivas de Suelos, Rocas y Materiales a Fines (Materiales y
Pavimentos)

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá D.C., Colombia
Septiembre 09 de 2019

Dedicatoria:

A mi Hermano Cesar Augusto (Q.E.P.D. 1979 - 2018), por su dedicación a la familia, deseos de superación y ejemplo de humildad que se convierten en pilares de enseñanza y progreso del ser.

“La humildad es el sólido fundamento de todas las virtudes.” - Confucio

Agradecimientos

El autor agradece a las personas que colaboraron en la realización del presente trabajo final de maestría, en especial a:

La Profesora Carol Andrea Murillo Feo por su dedicación, apoyo, direccionamiento y aportes como directora de tesis.

Al Proyecto de Investigación DROMOS - CEIBA por sus contribuciones en la fase de exploración y de muestreo del presente documento.

A mis compañeros del grupo de estudios de maestría en la fase de exploración, muestreo y experimentación, al personal de apoyo brindado por el Laboratorio de Geotecnia de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá y a la comunidad del departamento del Vichada, con quienes se compartieron experiencias y enseñanzas que contribuyeron al perfeccionamiento de los objetivos.

Resumen

Surge como necesidad el aprovechar, para zonas apartadas de Colombia, donde los recursos de inversión en su red vial son casi inexistentes, el potencial que deriva de la explotación in situ de fuentes de material para conformación de terraplenes en las proximidades a los proyectos viales.

En consecuencia, y dada la carencia de vías que permitan la adecuada conexión regional en el departamento del Vichada y así su competitividad económica y demás aspectos que implican desarrollo social, este trabajo escrito pretende la evaluación de los materiales pétreos de las zonas circundantes del corredor vial entre los Municipios de La Primavera y Puerto Carreño, sector La Primavera – La Defensa (Caño La Defensa), con el propósito de determinar sus propiedades mecánicas y de desempeño para la malla vial secundaria y terciaria, en condiciones naturales y estabilizadas con cal y cemento.

Con el fin de identificar una mezcla que mejore la mecánica del material, y con ayuda de sus condiciones de índice de plasticidad y de porcentaje que pasa el tamiz No. 200, se establece como mejoradores para el presente trabajo a la cal hidratada y al cemento portland.

Dichos cementantes y/o activadores en la estabilización del suelo de estudio, identifican una fórmula de trabajo que permita mejorar la mecánica del material, estableciendo mezclas con porcentajes de dosificación del 3%, 4% y 5% para las mezclas de suelos + cal (Según establece ASTM D-6276-03) y de 3%, 5% y 7% para mezclas de suelos + cemento (obedeciendo a recomendaciones del Artículo 350-13 del INVIAS). Para tales mezclas se analizaron las propiedades del suelo a 3, 7 y 14 días.

Para los suelos analizados, se evaluó el comportamiento frente a su potencial de hidrogeno – pH, pérdidas de humedad, límites de consistencia, absorción y succión del suelo, resistencia a la compresión simple y velocidades de onda. Dicho proceso de evaluación permitió establecer mezclas con cal y cemento del 4.0% y 3.6% respectivamente como concentraciones de trabajo óptimas, con las que posteriormente se pretendió establecer mediante pruebas cíclicas de cargas evaluar un desempeño del material.

Finalmente, y por los resultados encontrados, tanto en respuesta a cargas monotónicas como cíclicas, podemos denotar un mejor comportamiento para las resistencias en las mezclas con cemento. Aun cuando es importante resaltar las reducciones en el índice de

plasticidad, la mayor afectación del pH del suelo y los beneficios en las propiedades hidrófobas que las mezclas con cal demostraron en la presente experiencia.

Palabras clave: mejoramiento de suelos, materiales estabilizados, cementante y/o mejorador, características mecánicas, módulo resiliente, desempeño.

Abstract

Emerges as a need take advantage, for remote areas of Colombia, where the investments resources in your road network are almost nonexistent, the potential that derives of on- site exploitation from sources of material for shaping embankments in the vicinity of road projects.

In consequence, and given the lack of roads that allow adequate regional connection in the department of Vichada and thus its economic competitiveness and other aspects that imply social development, this written work intends the evaluation of stone materials of the surrounding areas of the road corridor between the municipalities of La Primavera and Puerto Carreño, sector La Primavera – La Defensa (Caño La Defensa), with the purpose to determine its mechanical and performance properties for the secondary and tertiary road network, in natural conditions and stabilized with lime and cement.

To identify a mixture that improves the mechanics of the material, and with the help of its conditions of index and percentage plasticity that passes the sieve No. 200, it is established as improvers for this work of hydrated lime and portland cement.

These cementing agents and / or activators in the stabilization of the study soil, identify a working formula that allows to improve the mechanics of the material, establishing mixtures with dosage percentages of 3%, 4% and 5% for mixtures soil + lime (According to ASTM D-6276-03) and 3%, 5% and 7% for mixtures soil + cement (according to recommendations of Article 350-13 of INVIAS). For such mixtures the soil properties were analyzed at 3, 7 and 14 days.

For the soils analyzed, the behavior against its hydrogen-pH potential, moisture losses, consistency limits, soil absorption and suction, resistance to simple compression and wave velocities was evaluated. This evaluation process allowed to establish mixtures with lime and cement of 4.0% and 3.6% respectively as optimal working concentrations, with which it was subsequently sought to establish through a cyclic load tests to evaluate the performance of the material.

Finally, and due to the results found, both in response to monotonic and cyclic loads, we can denote a better performance for resistance in cement mixtures. Although it is important to highlight the reductions in the plasticity index, the greater impact on soil pH and the benefits in hydrophobic properties that mixtures with lime demonstrated in the present experience.

Keywords: soil improvement, stabilized materials, cementing and/or improver, mechanical characteristics, resilient module, performance.

Contenido

Contenido	Pág.
1. Introducción	1
1.1 Identificación del problema.....	2
1.2 Objetivos	2
1.2.1.1 Objetivo General.....	2
1.2.1.2 Objetivos Específicos	2
1.3 Organización del trabajo final	3
2. Marco de referencia	5
2.1 Antecedentes temáticos	5
2.2 Marco teórico conceptual	6
2.2.1 Contrato interadministrativo de gerencia de proyectos No. 211083 de 2011 (FONADE – ANI)	7
2.2.2 Estudios y diseños de la conexión Puente Arimena – Puerto Carreño. Contrato No. 1734 de 2015 (INVIAS).	9
2.2.3 Estabilización química con silicato de sodio del material de préstamo de la vía La Primavera – Bonanza – La Venturosa en el departamento del Vichada.	10
2.2.4 Evaluación sobre el uso de cortes tratados de perforación petrolera en la construcción de vías terciarias.	10
3. Generalidades	11
3.1 Localización del proyecto y/o área de estudio	11
3.2 Descripción general del corredor	12
3.3 Geología y geomorfología del sector	17
3.3.1 Antecedentes geológicos	17
3.4 Hidrografía y clima	19
4. Desarrollo de la investigación.....	21
4.1 Tipo de investigación.....	21
4.2 Diseño metodológico de la investigación.....	21
4.3 Objeto de análisis.....	22
4.4 Plan de ensayos y pruebas de laboratorio.....	23
5. Campaña experimental	25
5.1 Fase exploratoria y de muestreo (In situ)	25
5.2 Fase de caracterización básica (microestructura y macroestructura del suelo)	29
5.2.1 Microestructura.....	29
5.2.2 Macroestructura.....	39
5.3 Fase de diseño con estabilizantes y desempeño de las mezclas	58
5.3.1 Suelo mejorado con cal	59

5.3.2	Suelo mejorado con cemento	81
6.	Análisis de resultados	105
6.1	Dosificaciones y/o concentraciones de mejoradores.....	105
6.2	Variación del potencial de hidrógeno (pH)	105
6.3	Humedad durante la reacción química.....	106
6.4	Estado hídrico mediante resultados de índice plástico	107
6.5	Eficacia hidráulica (absorción y succión).....	108
6.6	Velocidad de onda (Vp).....	109
6.7	Determinación de la dosificación de trabajo	111
6.8	Módulo de resiliencia	111
6.9	Resumen de resultados	115
7.	Conclusiones y recomendaciones	119
7.1	Conclusiones	119
7.2	Recomendaciones	127
8.	Bibliografía	129

Anexo A: Normas particulares y/o pruebas de ensayos.

Anexo B: Esquema general del contenido para el presente documento.

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1. Corredores Grupo 5. (Fuente: Google Maps 2019)	7
Figura 2-2. Geología Villavicencio – Puerto Carreño. Fuente: Mapa Geológico de Colombia – Ingeominas 2007 (Tomado de Unión Temporal Euroestudios, Durán & Osorio y Deloitte. Informe Final de febrero de 2013)	8
Figura 3-1. Localización General (Fuente a partir de Google Earth)	11
Figura 3-2. Localización General (Fuente a partir de Google Earth)	12
Figura 3-3. Red vial departamento del Vichada. Según tipo de superficie. (Fuente Ministerio del Transporte).....	13
Figura 3-4. Red vial nacional departamento del Vichada. (Fuente INVIAS, Mapa de carreteras)	14
Figura 3-5. Sector La Primavera - La Defensa (Caño La Defensa). Inadecuadas condiciones geométricas y de drenaje. (Elaboración propia).....	15
Figura 3-6. Sector La Primavera - La Defensa (Caño La Defensa). Inadecuadas condiciones de drenaje. (Elaboración propia).....	15
Figura 3-7. Sector La Primavera - La Defensa (Caño La Defensa). Encajonamientos que generan empozamiento de agua. (Elaboración propia)	16
Figura 3-8. Sector La Primavera - La Defensa (Caño La Defensa). Zonas laterales sin drenajes adecuados. (Elaboración propia)	16
Figura 3-9. Planchas 197 y 198. Municipio de la Primavera. (Fuente Servicio Geológico Colombiano)	17
Figura 3-10. Plancha 197 – La Primavera Modificado de Ochoa et al, 2014. Se puede ver un predominio de rocas del cuaternario. La Plancha 197 se encuentra limitada por las coordenadas: N1: 1´080.000 y N2: 1´120.000; E1: 835.000 y E2: 880.000. (Fuente Servicio Geológico Colombiano)	18
Figura 4-1. Objeto de análisis. (Elaboración propia)	23
Figura 4-2. Plan de ensayos de laboratorio. (Elaboración propia)	24
Figura 5-1. Apique No. 01 y 06. (Elaboración propia)	25
Figura 5-2. Apique No. 02. (Elaboración propia).....	26
Figura 5-3. Apique No. 03. (Elaboración propia).....	26
Figura 5-4. Apique No. 04. (Elaboración propia).....	26
Figura 5-5. Apique No. 05. (Elaboración propia).....	27
Figura 5-6. Apique No. 5A. (Elaboración propia)	27
Figura 5-7. Embalaje, rotulado y transporte de muestras. (Elaboración propia).....	27
Figura 5-8. Localización apiques fase exploratoria. (Fuente a partir de Google Earth) ...	28
Figura 5-9. Perfil estratigráfico, según apiques. (Elaboración propia)	29

Figura 5-10. Análisis por difracción de rayos X (DRX). (Fuente prueba de ensayo de DRX)	30
Figura 5-11. Composición según análisis por difracción de rayos X (DRX). (Fuente prueba de ensayo de DRX)	30
Figura 5-12. Composición según reporte de fluorescencia de rayos X (XRF). (Fuente prueba de ensayo de XRF)	31
Figura 5-13. Caracterización macroscópica. (Elaboración propia)	33
Figura 5-14. Caracterización macroscópica. Clasificación de Wentworth (1922), Douglas (1968)	33
Figura 5-15. A y C. corresponden a rocas ígneas con fenocristales de feldespato y carbonatos que las hacen muy competentes; B y D corresponden a rocas ígneas que se pueden fracturar y que han perdido su resistencia debido a posible meteorización química por disolución. (Elaboración propia)	34
Figura 5-16. A. Se puede ver fragmentos de roca de tamaños grava fina a media; B Fragmentos de roca de tamaño Grava media a gruesa. Se destacan los granos de cuarzo y feldespato embebidos en una matriz silíceo lo que los hace bastante competentes, además se señala la porosidad secundaria por disolución $\phi 2$ de minerales inestables principalmente feldespatos. Se señala a su vez la linealidad de los minerales en algunas de las rocas; C. Se puede ver en esta muestra fragmentos subredondeados y en la parte inferior derecha de esta muestra un fragmento de roca alterado, el cual corresponde a algunos agregados que se dejan fracturar con el martillo geológico a diferencia de otros que debieron ser cortados por el disco diamantado. (Elaboración propia)	35
Figura 5-17. A y B, se puede ver los minerales de cuarzo (Qz) y plagioclasas (Plag) inalterados; C Roca Ígnea Plutónica en foto tomada en nicoles paralelos; D. Roca Ígnea Plutónica en foto tomada en nicoles cruzados en las cuales se aprecia la disolución parcial de feldespatos; E, F y G Rocas Ígneas Plutónicas. (Elaboración propia)	36
Figura 5-18. A Roca plutónica con cuarzitos micro cristalino (Qz mc) a la base, seguidos de cuarzitos poli cristalinos y al tope de la fotomicrografía cuarzitos con cristales de gran tamaño; B. Se puede ver una roca cuarzosa con una matriz micro cristalina y parches de cuarzo con cristales de mayor tamaño; C. Matriz de cuarzo micro cristalino y cristales de plagioclasas y cuarzo embebidos en dicha matriz; D. cuarzo con extinción radial; E foto en nicoles paralelos de cuarzo microcristalino con parches de cuarzo con cristales de cuarzo de mayor tamaño; F foto de la misma roca de la figura E tomada en nicoles cruzados. (Elaboración propia)	37
Figura 5-19. A y B, foto en nicoles paralelos y cruzados de roca de origen ígneo volcánico con matriz de cuarzo micro cristalino, en el cual hay feldespatos y cuarzitos embebidos. Los feldespatos presentan disolución parcial; C y D. detalle de matriz cuarzosa y cristales mejor desarrollados de feldespato y cuarzo, se observan a su vez pirita (Py) como mineral accesorio. (Elaboración propia)	37
Figura 5-20. Composición macroscópica. (Elaboración propia)	38
Figura 5-21. Escala Potencial de Hidrogeno – pH. (Fuente: https://foro.portalpez.com/threads/ph.125817/)	41
Figura 5-22. Capacidad de retención de agua (Absorción). Suelo natural. (Elaboración propia)	43

Figura 5-23. Capacidad de retención de agua (Succión). Suelo natural. (Elaboración propia)	44
Figura 5-24. Variación C.B.R (%). APQ No. 5. (Elaboración propia)	45
Figura 5-25. Variación C.B.R (%). APQ No. 5. (Elaboración propia)	46
Figura 5-26. Resultados compresión simple. Suelo natural. (Elaboración propia)	48
Figura 5-27. Curva Esfuerzo Vs. Deformación. Suelo natural. (Elaboración propia)	49
Figura 5-28. Esfuerzo máximo. Suelo natural. (Elaboración propia)	49
Figura 5-29. Deformación a la falla. Suelo natural. (Elaboración propia)	50
Figura 5-30. Comportamiento de la velocidad de onda. Suelo natural. (Elaboración propia)	51
Figura 5-31. Control pesos unitarios para prueba de módulo dinámico. (Elaboración propia)	52
Figura 5-32. Control humedades para prueba de módulo dinámico. (Elaboración propia)	53
Figura 5-33. Comportamiento del Mr en una muestra de arcilla con contenido de agua a) Inferior a la Humedad Optima y b) Superior a la Humedad Optima. Fuente: MEPDG (2004)	54
Figura 5-34. Comportamiento del Mr en una muestra de arcilla con contenido de agua OMC: Humedad inferior a la Humedad Optima, EMC: Humedad superior a la Humedad Optima y TMC: Humedad entre OMC y EMC. Fuente: S.R. Yang, W. H. Huang and Y. – T. Tai	54
Figura 5-35. Evolución del Mr con el esfuerzo desviador y la succión. Suelo arcilloso. Fuente: S.-R. Yang, H.-D., Lin, J.H.S. Kung and W.-H. Huang	55
Figura 5-36. Evolución del Mr con el esfuerzo desviador y la succión. Suelos Tipo A-6. Fuente: J.H.S. Kung, H-D. Lin, S. – J. Yang and W. – H. Huang	55
Figura 5-37. Relación entre el Módulo Resiliente y el Esfuerzo Desviador. Suelo Natural 7 días. (Elaboración propia)	57
Figura 5-38. Determinación del tipo de estabilizante según P200 y el IP. (Currin et al., 1976 en Mallela et al., 2004)	58
Figura 5-39. Variación del pH según concentración de cal. (Elaboración propia)	60
Figura 5-40. Comportamiento pH. Suelo + cal. (Elaboración propia)	61
Figura 5-41. Humedad durante la reacción química. suelo + cal. (Elaboración propia)...	62
Figura 5-42. Comportamiento IP (%) Vs. pH. Suelo + cal (Elaboración propia)	63
Figura 5-43. Comportamiento IP (%) según concentración de cal (Elaboración propia) .	63
Figura 5-44. Capacidad de retención de agua (Absorción). Suelo + cal. (Elaboración propia)	64
Figura 5-45. Capacidad de retención de agua (Succión). Suelo + cal. (Elaboración propia)	64
Figura 5-46. Curva Esfuerzo Vs. Deformación. Suelo + 3.0% Cal. (Elaboración propia)	67
Figura 5-47. Esfuerzo máximo. Suelo + 3.0% Cal. (Elaboración propia)	67
Figura 5-48. Deformación a la falla. Suelo + 3.0% Cal. (Elaboración propia)	68
Figura 5-49. Curva Esfuerzo Vs. Deformación. Suelo + 4.0% Cal. (Elaboración propia)	69
Figura 5-50. Esfuerzo máximo. Suelo + 4.0% Cal. (Elaboración propia)	69
Figura 5-51. Deformación a la falla. Suelo + 4.0% Cal. (Elaboración propia)	70

Figura 5-52. Curva Esfuerzo Vs. Deformación. Suelo + 5.0% Cal. (Elaboración propia) .	71
Figura 5-53. Esfuerzo máximo. Suelo + 5.0% Cal. (Elaboración propia)	71
Figura 5-54. Deformación a la falla. Suelo + 5.0% Cal. (Elaboración propia)	72
Figura 5-55. Resistencia según concentración de cal a diferentes edades. (Elaboración propia)	73
Figura 5-56. Comparativo esfuerzo máximo. Suelo + Cal. (Elaboración propia).....	73
Figura 5-57. Comparativa deformación a la falla. Suelo + Cal. (Elaboración propia)	74
Figura 5-58. Comportamiento de la velocidad de onda según concentración de cal. (Elaboración propia).....	75
Figura 5-59. Comportamiento de la velocidad de onda según concentración de cal. (Elaboración propia).....	75
Figura 5-60. Esfuerzo máximo en compresión simple. Suelo + Cal. (Elaboración propia)	76
Figura 5-61. Control pesos unitarios para prueba de módulo dinámico. Suelo + cal (Elaboración propia).....	77
Figura 5-62. Control humedades para prueba de módulo dinámico. Suelo + cal (Elaboración propia).....	78
Figura 5-63. Relación entre el Módulo Resiliente y el Esfuerzo Desviador. Suelo + Cal 4.0%. 7 días. (Elaboración propia)	79
Figura 5-64. Relación entre el Módulo Resiliente y el Esfuerzo Desviador. Suelo + Cal 4.0%. 14 días. (Elaboración propia)	80
Figura 5-65. Relación entre el Módulo Resiliente y el Esfuerzo Desviador. Suelo + Cal 4.0%. (Elaboración propia).....	80
Figura 5-66. Comportamiento pH. Suelo + cemento. (Elaboración propia).....	82
Figura 5-67. Humedad durante la reacción química. Suelo + cemento. (Elaboración propia)	83
Figura 5-68. Comportamiento IP (%) Vs. pH. Suelo + cemento (Elaboración propia)	84
Figura 5-69. Comportamiento IP (%) según concentración de cemento. (Elaboración propia)	84
Figura 5-70. Capacidad de retención de agua (Absorción). Suelo + cemento. (Elaboración propia)	85
Figura 5-71. Capacidad de retención de agua (Succión). Suelo + cemento. (Elaboración propia)	86
Figura 5-72. Curva Esfuerzo Vs. Deformación. Suelo + 3.0% Cemento. (Elaboración propia)	88
Figura 5-73. Esfuerzo máximo. Suelo + 3.0% Cemento. (Elaboración propia)	89
Figura 5-74. Deformación a la falla. Suelo + 3.0% Cemento. (Elaboración propia)	89
Figura 5-75. Curva Esfuerzo Vs. Deformación. Suelo + 5.0% Cemento. (Elaboración propia)	90
Figura 5-76. Esfuerzo máximo. Suelo + 5.0% Cemento. (Elaboración propia)	91
Figura 5-77. Deformación a la falla. Suelo + 5.0% Cemento. (Elaboración propia)	91
Figura 5-78. Curva Esfuerzo Vs. Deformación. Suelo + 7.0% Cemento. (Elaboración propia)	92
Figura 5-79. Esfuerzo máximo. Suelo + 7.0% Cemento. (Elaboración propia)	93

Figura 5-80. Deformación a la falla. Suelo + 7.0% Cemento. (Elaboración propia).....	93
Figura 5-81. Resistencia según concentración de cemento a diferentes edades. (Elaboración propia)	94
Figura 5-82. Comparativo esfuerzo máximo. Suelo + cemento. (Elaboración propia)	95
Figura 5-83. Comparativa deformación a la falla. Suelo + cemento. (Elaboración propia)	95
Figura 5-84. Comportamiento de la velocidad de onda según concentración de cemento. (Elaboración propia)	97
Figura 5-85. Comportamiento de la velocidad de onda según concentración de cemento. (Elaboración propia)	97
Figura 5-86. Esfuerzo máximo en compresión simple. Suelo + Cemento. (Elaboración propia)	98
Figura 5-87. Resistencia compresión simple. Falla 7 días. (Elaboración propia)	99
Figura 5-88. Control pesos unitarios para prueba de módulo dinámico. Suelo + cemento (Elaboración propia)	100
Figura 5-89. Control humedades para prueba de módulo dinámico. Suelo + cemento (Elaboración propia)	100
Figura 5-90. Relación entre el Módulo Resiliente y el Esfuerzo Desviador. Suelo + cemento 3.6%. 7 días. (Elaboración propia).....	102
Figura 5-91. Relación entre el Módulo Resiliente y el Esfuerzo Desviador. Suelo + cemento 3.6%. 14 días. (Elaboración propia).....	102
Figura 5-92. Relación entre el Módulo Resiliente y el Esfuerzo Desviador. Suelo + Cemento 3.60%. (Elaboración propia)	103
Figura 6-1. pH en mezclas con cal y cemento. (Elaboración propia)	106
Figura 6-2. Pérdida de humedad durante la reacción química.....	106
Figura 6-3. Comportamiento IP (%) Vs. pH (Elaboración propia).....	107
Figura 6-4. Comportamiento IP (%) Vs. pH. Cal y Cemento (Elaboración propia)	107
Figura 6-5. Capacidad de retención de agua (Absorción). (Elaboración propia)	108
Figura 6-6. Capacidad de retención de agua (Succión). (Elaboración propia)	108
Figura 6-7. Comportamiento de la velocidad de onda. Cal y cemento. (Elaboración propia)	110
Figura 6-8. Relación entre el Módulo Resiliente y el Esfuerzo Desviador. Presión de cámara 13.8kPa. (Elaboración propia)	112
Figura 6-9. Relación entre el Módulo Resiliente y el Esfuerzo Desviador. Presión de cámara 23.6kPa. (Elaboración propia)	113
Figura 6-10. Relación entre el Módulo Resiliente y el Esfuerzo Desviador. Presión de cámara 41.4kPa. (Elaboración propia)	114
Figura 6-11. Comportamiento esfuerzo axial máximo según prueba de corte triaxial. (Elaboración propia)	115
Figura 6-12. Resultados compresión simple suelo natural y mezclado con suelo calcinado al 7.0% y 10.0%. (Elaboración propia).....	118
Figura 8-1. Montaje prueba módulo resiliente. (Elaboración propia)	135
Figura 8-2. Probeta prueba de eficacia hidráulica. (Elaboración propia)	136
Figura 8-3. Protección y rotulado de probetas. (Elaboración propia)	136

Figura 8-4. Determinación del Potencial de hidrógeno (pH). (Elaboración propia)	137
Figura 8-5. Determinación del Potencial de hidrógeno (pH). (Elaboración propia)	137
Figura 8-6. Determinación del Potencial de hidrógeno (pH). (Elaboración propia)	137
Figura 8-7. Determinación del Potencial de hidrógeno (pH). (Elaboración propia)	138
Figura 8-8. Preparación de la muestra. (Elaboración propia)	139
Figura 8-9. Molde de compactación. (Elaboración propia)	139
Figura 8-10. Pistón de compactación. (Elaboración propia)	140
Figura 8-11. Montaje equipo de carga. (Elaboración propia)	140
Figura 8-12. Deformímetro para control de espesores. (Elaboración propia)	141
Figura 8-13. Conformación de capas. (Elaboración propia).....	141
Figura 8-14. Ranurador de punta metálica fina. (Elaboración propia).....	142
Figura 8-15. Probeta. (Elaboración propia)	142
Figura 8-16. Protección y rotulado de probetas. (Elaboración propia)	143
Figura 8-17. Máquina Universal de Ensayos (Marca Shimadzu). (Elaboración propia) .	144
Figura 8-18. Compresión Simple. (Elaboración propia)	144
Figura 8-19. Disposición de transductores. (Elaboración propia)	145
Figura 8-20. Equipo de Ultrasonido “Pundit Lab”. (Elaboración propia).....	146

Lista de tablas

Pág.

Tabla 2-1. Corredor No. 5. Posibles fuentes de materiales. Fuente según Unión Temporal Euroestudios, Durán & Osorio y Deloitte. Informe Final de febrero de 2013.....	9
Tabla 3-1. Red vial departamento del Vichada. Estado y tipo de superficie. (Fuente Ministerio del Transporte).....	13
Tabla 5-1. Localización apiques fase exploratoria. (Elaboración propia)	28
Tabla 5-2. Análisis por difracción de rayos X (DRX). (Fuente prueba de ensayo de DRX)	31
Tabla 5-3. Reporte de fluorescencia de rayos X (XRF).....	32
Tabla 5-4. Caracterización básica de materiales. Fuente propia	39
Tabla 5-5. Caracterización básica de materiales. Fuente Proyecto DROMOS-CEIBA....	39
Tabla 5-6. Valores límites del estado de consistencia. (Elaboración propia).....	39
Tabla 5-7. Variación de la densidad de los Material. (Elaboración propia).....	40
Tabla 5-8. Actividad arcillas. (Elaboración propia)	40
Tabla 5-9. Calificación del grado de acidez o basicidad de acuerdo con el pH.....	41
Tabla 5-10. Potencial de hidrógeno (pH). Suelo natural. (Elaboración propia).....	42
Tabla 5-11. Indicador de limpieza y partículas dañinas del material. (Elaboración propia)	42
Tabla 5-12. Requisitos de los materiales para terraplén. (Fuente Artículo INVIAS 220-13)	42
Tabla 5-13. Capacidad de retención de agua suelo natural. (Elaboración propia)	43
Tabla 5-14. Densidad máxima seca del material. (Elaboración propia)	44
Tabla 5-15. Variación del C.B.R.(%) con la profundidad, según Apique. (Elaboración propia).....	46
Tabla 5-16. Elaboración probetas. Suelo natural. (Elaboración propia)	47
Tabla 5-17. Datos característicos probetas No. 25 a 28. Suelo Natural. (Elaboración propia)	47
Tabla 5-18. Resultados compresión simple. Suelo natural. (Elaboración propia).....	48
Tabla 5-19. Consistencia de arcillas según resistencia a la compresión simple.....	48
Tabla 5-20. Velocidad de onda. Suelo natural. Edad 12 días. (Elaboración propia).....	50
Tabla 5-21. Velocidad de onda. Suelo natural. Edad 37 días. (Elaboración propia).....	51
Tabla 5-22. Datos característicos probetas No. 29 y 32. Suelo natural (Elaboración propia)	52
Tabla 5-23 Módulo Resiliente. Suelo Natural 7 días. (Elaboración propia)	56

Tabla 5-24. Mr determinado mediante CBR. (Elaboración propia)	57
Tabla 5-25. Determinación pH (suelo + sal). (Elaboración propia)	59
Tabla 5-26. Comportamiento pH (suelo + cal). (Elaboración propia)	60
Tabla 5-27. Humedad durante la reacción química suelo + cal. (Elaboración propia)	61
Tabla 5-28. Pérdida de humedad en el tiempo. suelo + cal. (Elaboración propia)	61
Tabla 5-29. Comportamiento IP (%) Vs. pH. Suelo + cal. (Elaboración propia)	62
Tabla 5-30. Capacidad de retención de agua. Suelo + cal. (Elaboración propia)	64
Tabla 5-31. Elaboración de probetas. Suelo + cal. (Elaboración propia)	65
Tabla 5-32. Datos característicos Probetas No. 1 a 6. Suelo + cal. (Elaboración propia)	65
Tabla 5-33. Datos característicos Probetas No. 7 a 12. Suelo + cal. (Elaboración propia)	66
Tabla 5-34. Resultados compresión simple. Suelo + 3.0% Cal. (Elaboración propia).....	66
Tabla 5-35. Resultados compresión simple. Suelo + 4.0% Cal. (Elaboración propia).....	68
Tabla 5-36. Resultados compresión simple. Suelo + 5.0% Cal. (Elaboración propia).....	70
Tabla 5-37. Resistencia según concentración de cal a diferentes edades. (Elaboración propia)	72
Tabla 5-38. Velocidad de onda. Suelo + cal. Edad 12 días. (Elaboración propia)	74
Tabla 5-39. Velocidad de onda. Suelo + cal. Edad 37 días. (Elaboración propia)	74
Tabla 5-40. Datos característicos probetas No. 30 y 33. Suelo + cal (Elaboración propia)	77
Tabla 5-41. Resultados Módulo Resiliente. Suelo + cal 4.0%. 7 días. (Elaboración propia)	78
Tabla 5-42. Resultados Módulo Resiliente. Suelo + cal 4.0%. 14 días. (Elaboración propia)	79
Tabla 5-43. Comportamiento pH (Suelo + cemento). (Elaboración propia)	81
Tabla 5-44. Humedad durante la reacción química suelo + cemento. (Elaboración propia)	82
Tabla 5-45. Pérdida de humedad en el tiempo. Suelo + cemento. (Elaboración propia)	83
Tabla 5-46. Comportamiento IP (%) Vs. pH. Suelo + cemento. (Elaboración propia)	84
Tabla 5-47. Capacidad de retención de agua. Suelo + cemento. (Elaboración propia)	85
Tabla 5-48. Elaboración de probetas. Suelo + cal. (Elaboración propia)	87
Tabla 5-49. Datos característicos Probetas No. 13 a 18. Suelo + Cemento. (Elaboración propia)	87
Tabla 5-50. Datos característicos Probetas No. 19 a 24. Suelo + Cemento. (Elaboración propia)	87
Tabla 5-51. Resultados compresión simple. Suelo + 3.0% Cemento. (Elaboración propia)	88
Tabla 5-52. Resultados compresión simple. Suelo + 5.0% Cemento. (Elaboración propia)	90
Tabla 5-53. Resultados compresión simple. Suelo + 7.0% Cemento. (Elaboración propia)	92
Tabla 5-54. Resistencia según concentración de cemento a diferentes edades. (Elaboración propia).....	94
Tabla 5-55. Velocidad de onda. Suelo + cemento. Edad 12 días. (Elaboración propia)	96

Tabla 5-56. Velocidad de onda. Suelo + cemento. Edad 37 días. (Elaboración propia) ..	96
Tabla 5-57. Resistencia compresión simple. maduración 7 días. (Elaboración propia)...	98
Tabla 5-58. Datos característicos probetas No. 31 y 34. Suelo + cemento (Elaboración propia).....	99
Tabla 5-59. Resultados Módulo Resiliente. Suelo + cemento 3.6%. 7 días. (Elaboración propia).....	101
Tabla 5-60. Resultados Módulo Resiliente. Suelo + cemento 3.6%. 14 días. (Elaboración propia).....	101
Tabla 6-1. Dosificación mejoradores	105
Tabla 6-2. Capacidad de retención de agua. Cal y cemento. (Elaboración propia).....	109
Tabla 6-3. Rango de velocidades para ondas compresivas en el suelo y la roca. (Fuente ASTM D 5777).....	110
Tabla 6-4. Dosificación de trabajo. Cal y cemento. (Elaboración propia)	111
Tabla 6-5. Esfuerzo axial máximo prueba de corte triaxial. (Elaboración propia)	114
Tabla 6-6. Resumen propiedades intrínsecas de los materiales. (Elaboración propia) ..	116
Tabla 6-7. Resumen propiedades hidráulicas. (Elaboración propia)	116
Tabla 6-8. Resumen propiedades mecánicas (Compresión simple. Natural y cal). (Elaboración propia)	116
Tabla 6-9. Resumen propiedades mecánicas (Compresión simple. Natural y cemento). (Elaboración propia)	116
Tabla 6-10. Resumen propiedades mecánicas (Velocidad de onda. Falla 7 días). (Elaboración propia)	117
Tabla 6-11. Resumen propiedades mecánicas (Velocidad de onda. Falla 37 días). (Elaboración propia)	117
Tabla 6-12. Resumen propiedades mecánicas (Módulo resiliente. Falla 7 y 14 días). (Elaboración propia)	117
Tabla 7-1. Costo unitario estabilizantes (Año 2019). (Elaboración propia).....	127

1.Introducción

Dadas las brechas existentes, el crecimiento y desarrollo desigual regional del país, se establece en el Plan Nacional de Desarrollo - PND 2010-2014 en el Literal C del Capítulo II “*Estrategia, ruta y esquema operativo para conformar áreas de desarrollo territorial (ADT)*” estrategias de reducción para los desequilibrios de desarrollo regional, tales como el de articular las áreas de menor desarrollo con los centros de mayores capacidades funcionales, formando así redes y encadenamientos productivos. En consecuencia, para los Departamentos del centro del país, junto con Meta, Casanare, Arauca, Vichada y Guaviare es posible constituir áreas de desarrollo alrededor el principal centro regional de la Orinoquia colombiana del (eje Bogotá - Villavicencio), considerando así tres ejes de integración:

- Villavicencio - Yopal - Arauca;
- Villavicencio - Puerto López - Puerto Gaitán - Puerto Carreño
- Villavicencio - San José de Guaviare.

Resultado del anterior planteamiento, el departamento del Vichada demanda la construcción de vías que permitan una conectividad con el centro del país, por tanto, se requiere optimizar y mejorar el estado de la infraestructura de la red vial con el propósito de permitir la conexión municipal, regional y departamental.

Dada la peculiaridad de los proyectos viales, las particularidades de los suelos en lo amplio de la geografía colombiana, información insuficiente relacionada con los materiales naturales predominantes que puedan ser empleados en la construcción y el mantenimiento de vías para el departamento del Vichada, se crea la necesidad de evaluar el potencial de los materiales de dicha región en un sector específico como área.

Como área de estudio para el presente trabajo se define el corredor vial entre el Municipio de La Primavera y Puerto Carreño, sector La Primavera – La Defensa (Caño La Defensa), dentro del alcance se identificará y caracterizará mecánicamente los materiales de rasante de la zona de influencia, evaluando así su resistencia, desempeño y durabilidad; pretendiendo así, establecer la utilización en forma natural o como material estabilizado, mezclas de suelo – cemento o suelo – cal, aplicable a la estructuras de un terraplén.

1.1 Identificación del problema

Dada la necesidad de evaluar tecnologías y procedimientos constructivos que permitan la utilización de materiales propios del departamento del Vichada, en el desarrollo de su malla vial como una solución económica, se requiere implementar alternativas que viabilicen la utilización de los suelos del sector como material que conforme la estructura del pavimento de la red vial de la región.

Es de destacar que para algunos sectores del país, los materiales locales no reúnen las condiciones técnicas y mecánicas a que hace referencia las “Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Normas de Ensayo para Materiales de Carreteras” emitidas por el Instituto Nacional de Vías – INVIAS (2013), lo que inhibe la necesidad de caracterizar y estudiar los materiales de la zona para su utilización en forma natural o mejorada en la estructura del pavimento, condición que permitiría controlar los costos de ejecución de los proyectos al generar menores tiempos y longitud de acarreo desde la fuente hasta los sitios de disposición de los pétreos.

1.2 Objetivos

1.2.1.1 Objetivo General

Identificar y caracterizar, en un tramo de estudio, los materiales de rasante y materiales provenientes de canteras predominantes en la zona de influencia, con el fin de que puedan ser utilizados en forma natural o como material estabilizado aplicable a la estructura de pavimento para vías de la malla vial secundaria y terciarias.

1.2.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar y caracterizar materiales naturales y artificiales de disponibilidad regional que puedan ser empelados en actividades de construcción y mantenimiento de vías secundarias y terciarias.
- Evaluar la alternativa con un agente estabilizante y su dosificación adecuada que permitan establecer el buen comportamiento de los materiales analizados para la construcción y mantenimiento de vías secundarias y terciarias.
- Analizar desde el punto de vista económico la factibilidad de las técnicas de estabilización química investigadas en el proyecto.

1.3 Organización del trabajo final

Este trabajo se desarrolla en ocho (8) capítulos cada uno enfocado en dar cumplimiento a los objetivos del documento (Ver anexo B):

- Capítulo 1. Contiene la introducción, identificación del problema, objetivos generales y específicos y la estructuración del trabajo.
- Capítulo 2. Presenta un marco de referencia con sus antecedentes temáticos y marco teórico conceptual que permite conocer un estado del arte e investigaciones sobre trabajos con suelos del vichada.
- Capítulo 3. Como generalidades del proyecto, este capítulo presenta una localización y su área de estudio, una descripción general del corredor, una geología y geomorfología del sector y datos referentes a la hidrografía y clima predominante.
- Capítulo 4. Este capítulo presenta como se desarrolla la investigación, el cual detalla el tipo de investigación, su diseño metodológico, el objeto de análisis y un plan de ensayos.
- Capítulo 5. Se muestran el desarrollo de la campaña experimental: fase exploratoria y de muestreo, fase de caracterización básica y de diseño con estabilizantes. Se explica el proceso del trabajo de campo para la toma de datos y se establecen los criterios para el análisis de la información: gráficas, tabulación, figuras, entre otros.
- Capítulo 6. Del análisis de resultados, se establecen los comparativos, resúmenes y análisis de los resultados encontrados.
- Capítulo 7. De las conclusiones y recomendaciones, capítulo en el que se da respuesta a los objetivos del trabajo y se tratan algunos aspectos que se podrían realizar a futuro para fortalecer la presente investigación.
- Capítulo 8. Bibliografía.
- Anexos A. Normas particulares y/o pruebas de ensayos. Se describen los procesos para las pruebas de campo y laboratorio realizadas.
- Anexos B. Esquema general del contenido para el presente documento.

2.Marco de referencia

2.1 Antecedentes temáticos

Modificar las propiedades mecánicas de materiales de sitio para hacer de estos un material de préstamo con características específicas de comportamiento mecánico y/o de desempeño frente a condiciones climáticas, y que puedan aportar en la conformación de la estructura granular de un pavimento como subrasante mejorada, materiales para terraplén, afirmados, subbases granulares, bases granulares, etc.; establecen en su concepción procesos de estabilización y/o mejoramiento de suelos naturales y/o agregados procedentes de trituración y/o clasificación.

La técnica aplicada para la estabilización de suelos depende en gran medida de las características de los suelos disponibles. Por ende, la necesidad de una caracterización adecuada (física y química) que permita identificar la compatibilidad del suelo y el agente estabilizante.

Como procesos de estabilización y/o mejoramiento de granulares, podemos encontrar:

- Estabilización mecánica
- Estabilización física
- Estabilización química
- Estabilización físico - química

El desempeño del material dentro de la estructura del pavimento se define mediante parámetros que determinen resistencia, durabilidad, actividad, compresibilidad, limpieza, consistencia y composición granulométrica.

La estabilización mecánica consiste en una densificación del material mediante procesos mecánicos, generalmente procesos de compactación, aplicados al suelo logrando mejorar sus propiedades resistentes, por otro lado, la estabilización física busca mejorar las propiedades del suelo mediante ajustes en la granulometría del suelo inicial y/o mediante el aporte de materiales cohesivos o granulares.

La estabilización química de suelos se ha clasificado en estabilizantes tradicionales (cal, cemento, cenizas), estabilizantes subproducto (limo de cemento, limo de cal, polvo de

cemento y otros subproductos de la fabricación de estos materiales) y estabilizantes no tradicionales (sales, ácidos, enzimas, polímeros, etc.). A continuación, se presenta una clasificación y descripción de diferentes estabilizantes por su mecanismo de acción:

- Estabilización Iónica.

La estabilización iónica consiste en adicionar electrolito al suelo de modo tal que las arcillas se intercambien con iones de mayor carga como Mg^{2+} , Ca^{2+} , Al^{3+} , de manera que pierdan su expansibilidad y disminuyan su capacidad de retener agua. Para esto se utilizan soluciones acuosas de sales como cloruro de magnesio, sulfato de magnesio, cloruro de calcio y sulfato de aluminio. Otra forma de estabilización iónica consiste en saturar el suelo con sales de cationes monovalentes, sales como cloruro de sodio, de amonio o de potasio.

- Estabilización Alcalina (Cementantes hidráulicos).

Entre los materiales que se pueden emplear como agentes estabilizantes con propiedad cementante, se encuentran los siguientes:

- Cemento
- Cal
- Ceniza volante
- Metacaolín
- Escorias de procesos siderúrgicos
- Cascarella de arroz
- Cenizas residuo de biocombustibles
- Mezcla silicato de sodio – cal – puzolana

En adición al cemento, la cal y los materiales bituminosos, otros agentes, como algunos residuos de procesos industriales y agrícolas se pueden usar como reemplazo de los materiales cementantes tradicionales en la solidificación y estabilización de suelos.

Queda por aclarar, consecuente a lo anterior, que podemos encontrar procesos constructivos que involucran las estabilizaciones mecánicas, física y químicas en un mismo suelo para lograr las propiedades mecánicas requeridas.

2.2 Marco teórico conceptual

En consideración a las necesidades del departamento del Vichada para lograr desarrollo en su infraestructura de transporte y una conectividad regional, encontramos una serie de estudios que pretenden dentro de sus independientes objetivos, los de lograr definir vías con unas condiciones de geométricas y de trazado adecuadas, optimización de los recursos disponibles en la región y/o tecnologías de estabilización que permitan establecer soluciones económicas frente a los escenarios climáticos de la zona. Dentro de dichos estudios podemos encontrar:

2.2.1 Contrato interadministrativo de gerencia de proyectos No. 211083 de 2011 (FONADE – ANI)

Recopilado del documento “*Informe Final*” de febrero de 2013, Proyecto 5. Corredor Puente Arimena – Puerto Carreño, la Unión Temporal Euroestudios, Durán & Osorio y Deloitte resulto adjudicataria como Estructuradores Integrales (E.I.) al contrato correspondiente al Grupo 3 Centro Oriente, Corredores. (1) Perimetral de Oriente de Cundinamarca, (2) Bogotá-Villavicencio (Sectores 1 y 3), (3) Villavicencio-Arauca incluye el Sector de la Transversal del Sisga (Chocontá-Aguaclara), (4) Malla Vial del Meta, y (5) Puente Arimena-Puerto Carreño.

Para nuestro interés, en la Figura 2-1 encontramos el Corredor No. 5. Villavicencio – Arauca: Tramo entre Puerto Arimena y Puerto Carreño (Tramo carreteable existente no accesible todo el año – Longitud aproximada 650 Km).



Figura 2-1. Corredores Grupo 5. (Fuente: Google Maps 2019)

- Conclusión estudios de pavimentos. Caracterización Geotécnica.

En el corredor Puente Arimena – Puerto Carreño no se realizó exploración geotécnica específica, por lo que se trabajó con los apiques realizados entre Puerto Carreño y Puente Arimena, que corresponde al mismo tipo de suelos de acuerdo con la información

geológica del corredor, donde se encuentran principalmente suelos sedimentarios areno-arcillosos, pertenecientes a unidades geológicas de depósitos de terrazas (Qt) y Rocas sedimentarias Continentales (N-Sc), como se aprecia en la Figura 2-2.

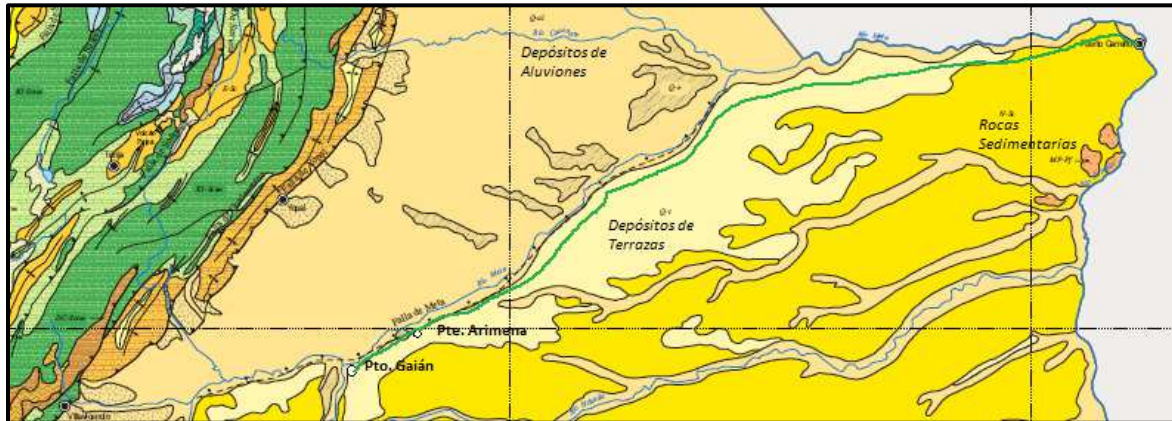


Figura 2-2. Geología Villavicencio – Puerto Carreño. Fuente: Mapa Geológico de Colombia – Ingeominas 2007 (Tomado de Unión Temporal Euroestudios, Durán & Osorio y Deloitte. Informe Final de febrero de 2013)

El tramo presenta como superficie material de afirmado conformado de un lado por arenas limosas no plásticas con contenidos de gravas superiores a 30% y con CBR entre 54% y 59% al 95% de la máxima densidad de compactación según el ensayo de proctor modificado, y por otro lado por gravas limosas con contenidos de finos entre el 18% y el 38% no plásticos, con CBR entre 47% y 70% al 95% de la máxima densidad del proctor modificado. Estas capas de arenas y gravas se encuentran en espesores variables entre 10 cm y 60 cm.

En cuanto a la subrasante, corresponde a suelos conformados por arcillas de baja plasticidad y en un caso particular de alta plasticidad, con porcentajes de finos que varían entre 60% y 92%, con límites líquidos desde 21% hasta 47% e índices de plasticidad entre 7% y 23%; lo que califica con potencial bajo y medio a expandirse volumétricamente ante variaciones de humedad. Los porcentajes de CBR en condición sumergida para las muestras inalteradas varía entre 1.2% y 3.9%, siendo predominantemente inferior a 3.0%, por lo que se debe contemplar un mejoramiento de la subrasante, además de implementar un manejo adecuado de sistema de drenaje.

Para la subrasante se contempló un CBR de 5%, teniendo en cuenta que la mayor parte del corredor se contempla en terraplén, sin embargo, si en algunos sitios se cimienta la

estructura sobre la subrasante se deberá contemplar la incorporación de material granular, que garantice el valor de diseño asumido.

▪ Fuentes de material.

Las fuentes de materiales para los agregados de las subbases y bases granulares, agregados para concreto y mezcla asfáltica, deberán ser extraídos de las fuentes de materiales cercanas existentes en los departamentos de Meta y Casanare, definidas en los Corredores 3 y 4 del Grupo 3 de estructuraciones. Lo anterior conforme a que, en el reconocimiento geológico realizado, no se identificaron posibles formaciones que pudieran cubrir las especificaciones técnicas de este tipo de agregados.

Tabla 2-1. Corredor No. 5. Posibles fuentes de materiales. Fuente según Unión Temporal Euroestudios, Durán & Osorio y Deloitte. Informe Final de febrero de 2013

Fuente de Material	Municipio	Coordenada Este	Coordenada Norte	Distancia a Trazado	Tipo Material	Volumen (m3)
Préstamo 1 (Río Meta)	Puerto Gaitán	1,287,935	1,011,201	9,2 km	Aluvial	10.464.000
Préstamo 2 (Río Meta)	Puerto Gaitán	1,325,279	1,029,972	6,27km	Aluvial	7.000.000
Préstamo 3 (Río Meta)	Santa Rosalia	1,346,627	1,055,497	12 km	Aluvial	11.200.000
Préstamo 4 (Río Meta)	Primavera	1,512,778	1,166,425	9,2 km	Aluvial	1.586.000
Préstamo 5 (Río Meta)	Primavera	1,519,207	1,168,622	10 km	Aluvial	456.000
Préstamo 6 (Río Meta)	Puerto Carreño	1,561,520	1,178,745	7,0 km	Aluvial	3.200.000
Préstamo 7 (Río Orinoco)	Puerto Carreño	1,730,054	1,178,093	2,6 km	Aluvial	1.507.000
Préstamo 8 (Río Orinoco)	Puerto Carreño	1,730,437	1,172,378	8,3 km	Aluvial	874.000
Préstamo 9 (Río Meta)	Santa Rosalia	1,421,157	1,108,405	5,0 km	Aluvial	14.578.000
Total						36.287.000

2.2.2 Estudios y diseños de la conexión Puente Arimena – Puerto Carreño. Contrato No. 1734 de 2015 (INVIAS).

Tomado del Concurso de Méritos No. CMA-DT-SEI-112-2015, dicha consultoría actualmente en ejecución, tiene como alcances el diseño geométrico de la nueva rasante, la estructura de pavimento, terraplenes, obras hidráulicas, puentes, pontones, viaductos, túneles, así como el diseño de la solución de todos los sitios críticos que se encuentren en el tramo en estudio, bien sea por inestabilidades de taludes inferiores o superiores, caídas de banca, derrumbes, estudio de fuentes de materiales con su respectiva incidencia en los tramos definidos, atención de puntos de alta accidentabilidad y demás problemas que se presenten en la vía, con el fin de mejorar las condiciones de seguridad de los usuarios,

estabilidad de las obras y la disminución de los tiempos de viaje de estos usuario y garantizar su transitabilidad.

En consulta realizadas al Instituto Nacional de Vías en aras de conocer los resultados y/o avances del proyecto de estudios y diseños de la Conexión Puente Arimena – Puerto Carreño, dicho Instituto mediante Oficio SEI 58343 de 21/12/18 emitido por la Subdirección de Estudios e Innovación comunica que a la fecha no se puede suministrar dicha información por cuanto el proyecto se encuentra en ejecución y gran parte del alcance del mismo está en proceso de concepto de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales - ANLA y de revisión y aprobación de Diagnóstico Ambiental de Alternativas.

2.2.3 Estabilización química con silicato de sodio del material de préstamo de la vía La Primavera – Bonanza – La Venturosa en el departamento del Vichada.

El documento *“Estabilización química con silicato de sodio del material de préstamo de la vía La Primavera – Bonanza – La Venturosa en el departamento del Vichada”* (Caballero O. J., 2017), presenta como objetivo general el de evaluar el efecto de emplear silicato de sodio con el material local de préstamo de la vía La Primavera – Bonanza – La Venturosa, con miras a su utilización en la construcción de vías.

2.2.4 Evaluación sobre el uso de cortes tratados de perforación petrolera en la construcción de vías terciarias.

El documento *“Evaluación sobre el Uso de Cortes Tratados de Perforación Petrolera en la Construcción de Vías Terciarias”* (Soto, 2017), presenta como objetivo general el de evaluar el efecto de emplear silicato de sodio con el material local de préstamo de la vía La Primavera – Bonanza – La Venturosa, con miras a su utilización en la construcción de vías.

3.Generalidades

3.1 Localización del proyecto y/o área de estudio

El proyecto se desarrolla en su totalidad en el departamento del Vichada, el área de estudio se enmarca en un sector definido entre el municipio de La Primavera y La Defensa (Caño La Defensa) en una longitud aproximada de 60.0km, ubicado sobre el trazado y zonas aledañas del corredor vial que del municipio de La Primavera conduce al municipio de Puerto Carreño.



Figura 3-1. Localización General (Fuente a partir de Google Earth)

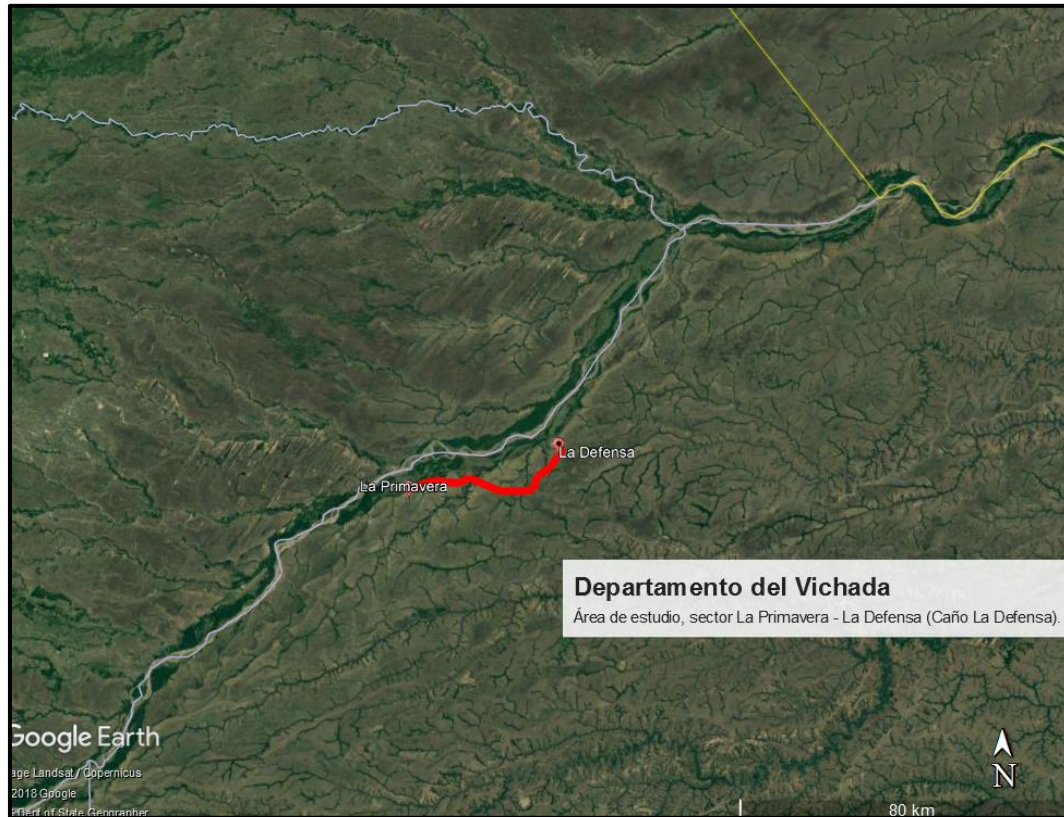


Figura 3-2. Localización General (Fuente a partir de Google Earth)

El Municipio de La Primavera está situado en el extremo oriental del país y de la región de la Orinoquía colombiana, localizado entre los $06^{\circ}19'34''$ y $02^{\circ}53'58''$ de latitud norte y $67^{\circ}25'1''$ y $71^{\circ}7'10''$ de longitud oeste. Cuenta con una superficie de 98.970 km^2 lo que representa el 8.6 % del territorio nacional. Limita por el Norte con el río Meta que lo separa de los departamentos de Casanare, Arauca y la República de Venezuela; por el Este con el río Orinoco que lo separa de la República de Venezuela, por el Sur con el río Guaviare que lo separa de los departamentos de Guainía y Guaviare y por el Oeste con los departamentos de Meta y Casanare (Alcaldía de la Primavera, 2018).

3.2 Descripción general del corredor

El municipio de la Primavera cuenta con tres modos de acceso desde la zona centro del país, utilizando ruta aérea desde la ciudad de Villavicencio; ruta terrestre y fluvial desde el municipio de Puerto Gaitán en el Meta.

La red vial que conforma el departamento del Vichada cuenta con 2.782km (3.5% de Red Vial Nacional, 59.5% Red Vial Departamental, 37.0% Red Vial Municipal) (Ministerio de Transporte, 2017):

Tabla 3-1. Red vial departamento del Vichada. Estado y tipo de superficie. (Fuente Ministerio del Transporte)

Red Vial departamento del Vichada										
Competencia	Pavimentada (km)			Afirmado (km)			Tierra (km)			Total (km)
	Bueno	Regular	Malo	Bueno	Regular	Malo	Bueno	Regular	Malo	
Nación	37,00			59,00						96,00
Departamento				68,00	535,25	75,20	94,00	698,35	185,00	1655,80
Municipio				69,23	24,00		75,81	768,44	92,50	1029,98
Total (km)	37,00	0,00	0,00	196,23	559,25	75,20	169,81	1466,79	277,50	2781,78

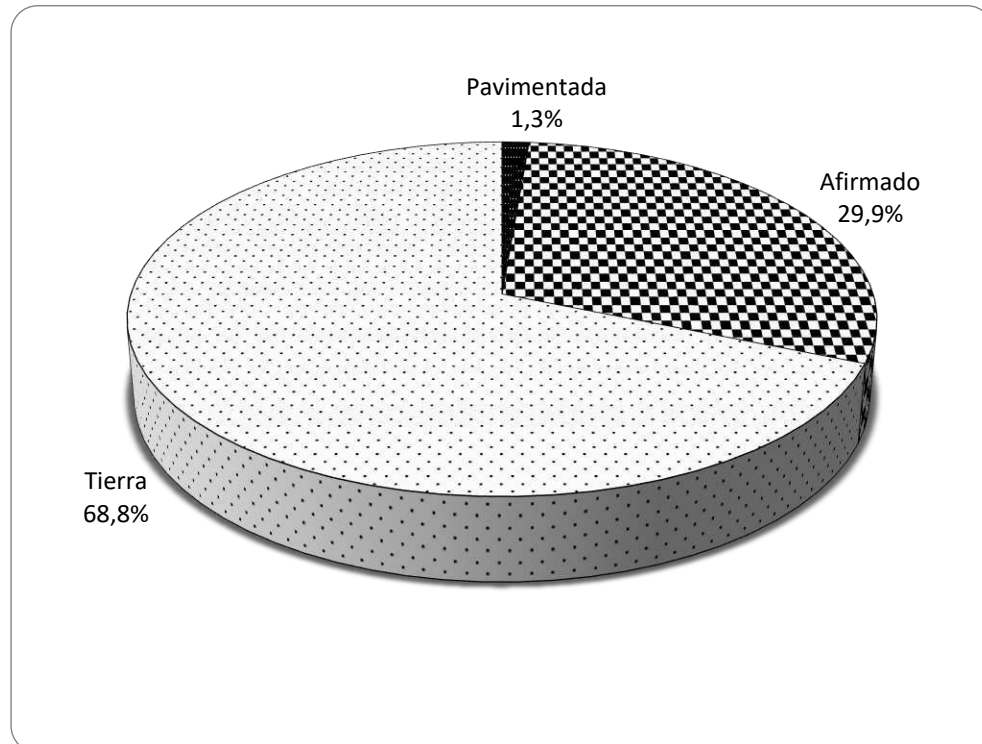


Figura 3-3. Red vial departamento del Vichada. Según tipo de superficie. (Fuente Ministerio del Transporte)

Es de resaltar que solo un 3.5% en red vial nacional con 96.0km (Ruta 4015 sector Juriepe - Puerto Carreño), de los cuales solo 37.0km (1.30%) se encuentran en buen estado.

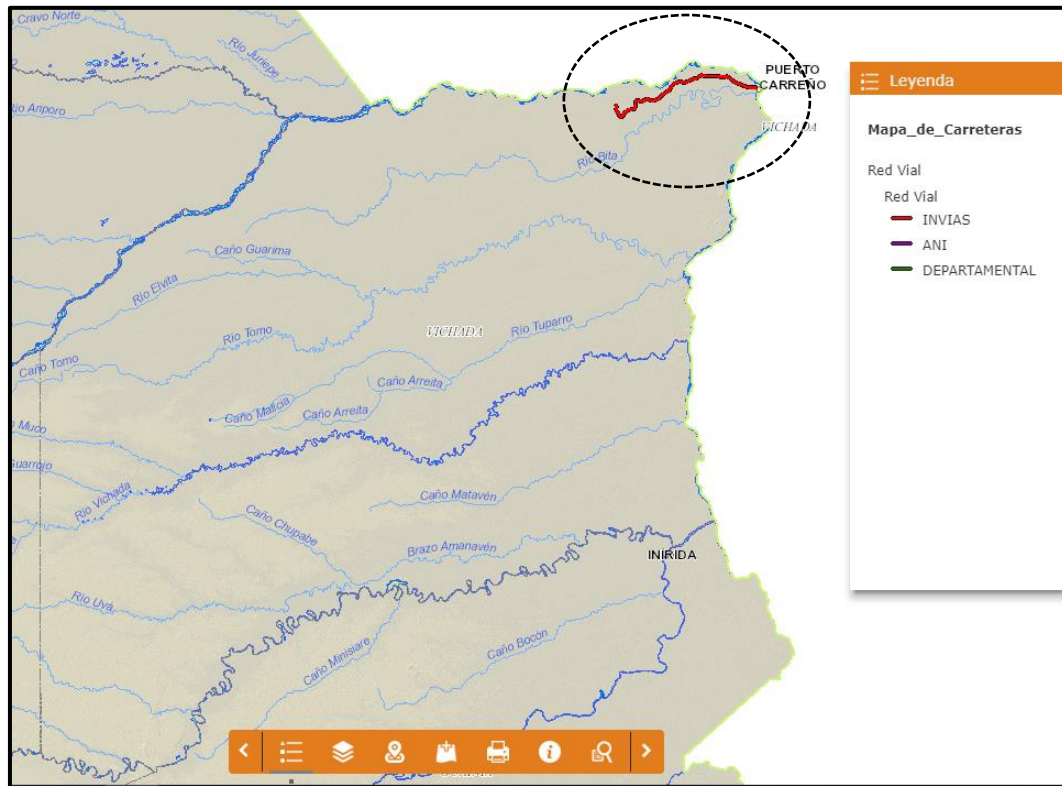


Figura 3-4. Red vial nacional departamento del Vichada. (Fuente INVIAS, Mapa de carreteras)

Actualmente el INVIAS mediante proceso de concurso de méritos CMA-DT-SEI-112-2015 suscribió Contrato No. 1734 de 2015, actualmente en ejecución, con Objeto: “Estudios y diseños de la conexión Puente Arimena – Puerto Carreño, departamentos de Vichada y Meta” el cual pretende como alcance inicial el diseño geométrico de la nueva rasante, la estructura de pavimento, terraplenes, obras hidráulicas, puentes, pontones, viaductos, túneles, entre otros, del sector Puerto Arimena en el departamento del Meta y Puerto Carreño en el departamento del Vichada.

En lo que respecta al corredor evaluado, la situación evidente del área de estudio obedece a un carretable sin condiciones técnicas adecuadas: geometría sin definición, vía sin pavimentar en su totalidad, algún tipo de inversión en la conformación de terraplenes con materiales del sitio y obras de arte tipo alcantarilla e inadecuados sistemas de drenajes; limitando así la transitabilidad y la disminución considerable del tránsito en los periodos invernales.

A continuación, se relacionan, algunos aspectos relevantes frente al estado corredor vial estudiado:

- No existen condiciones geométricas ni de drenaje que ayuden al adecuado funcionamiento de los terraplenes existentes, para así garantizar una apropiada transitabilidad.



Figura 3-5. Sector La Primavera - La Defensa (Caño La Defensa). Inadecuadas condiciones geométricas y de drenaje. (Elaboración propia)

- Obras de arte tipo alcantarillas para las cuales se deben de mejorar sus zonas de encole, descole y sus respectivos canales que permitan el adecuado drenaje de las aguas lluvias.



Figura 3-6. Sector La Primavera - La Defensa (Caño La Defensa). Inadecuadas condiciones de drenaje. (Elaboración propia)

- Inadecuados procesos de mantenimiento, los cuales pudieron ser ejecutados para recuperar la transitabilidad de la zona; considerados como inadecuados por la presencia de cajones de empozamiento de agua (sin capacidad de drenaje de las aguas lluvias) al no generar nuevos rellenos luego del retiro del material sin condiciones mecánicas apropiadas afectadas por la lluvia y tránsito de vehículos.



Figura 3-7. Sector La Primavera - La Defensa (Caño La Defensa). Encajonamientos que generan empozamiento de agua. (Elaboracion propia)

- Zonas laterales de acumulación de agua, las cuales afectan la estructura del relleno, su estabilidad y el buen desempeño en el tiempo.



Figura 3-8. Sector La Primavera - La Defensa (Caño La Defensa). Zonas laterales sin drenajes adecuados. (Elaboracion propia)

3.3 Geología y geomorfología del sector.

3.3.1 Antecedentes geológicos

Atendiendo la recopilación bibliográfica realizada por Ochoa et al (2012) para el sector del Vichada y Guanía (Bruneton P et al, 1983; INGEOMINAS en su Publicaciones Especiales No.1, Página 1 – 235, en 1983; T, Garzón G. 1987; Buena ventura y Rosas, 1988; IV Conferencia Colombiana de Geología Ambiental; Cristancho JI, 1989; Roza y Pinto, 1989) se puede establecer que geológicamente este sector está dominado por rocas ígneas y metamórficas de edad precámbrica (4600 a 541.0 millones de Años MA) de composición cristalina.

Localmente se reportan sectores con rocas sedimentarias de edad precámbrico y sedimentos terciarios al norte y el oeste. Sobre las rocas del precámbrico se reportan depósitos cuaternarios de tipo aluvial y eólico, provenientes principalmente de rocas de edad precámbrica, los cuales son de interés minero al generar acumulaciones de minerales como las reportadas por el Ministerio de Minas y Energía de Venezuela entre 1974 – 1984, donde se evidenciaron la presencia de importantes yacimientos de minerales, principalmente tantalita - columbita, casiterita y estruverita, asociados a rocas y facies de granitos alcalinos, pegmatitas, características típicas del batolito de parguaza.

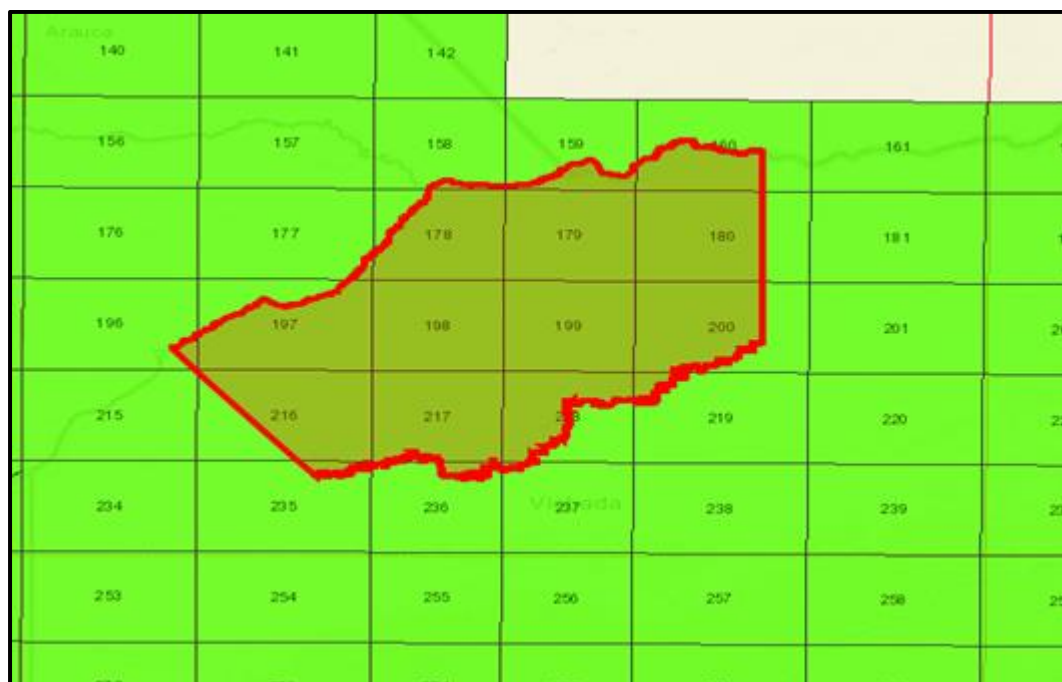


Figura 3-9. Planchas 197 y 198. Municipio de la Primavera. (Fuente Servicio Geológico Colombiano)

En la plancha 197 (Figura 3-9), de La Primavera el SGC reporta depósitos en planicies aluviales - Qhpa; depósitos de penillanura - Qp; depósitos de llanura de inundación - Qll y depósitos aluviales de cauce - Qac, como se presenta en la Figura 3-10.

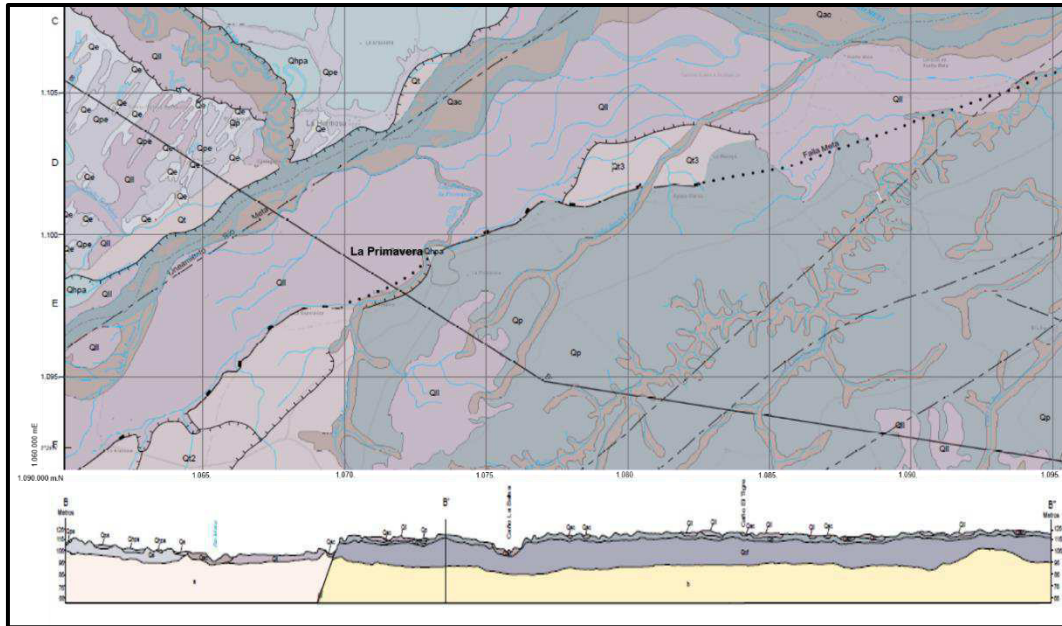


Figura 3-10. Plancha 197 – La Primavera Modificado de Ochoa et al, 2014. Se puede ver un predominio de rocas del cuaternario. La Plancha 197 se encuentra limitada por las coordenadas: N1: 1'080.000 y N2: 1'120.000; E1: 835.000 y E2: 880.000. (Fuente Servicio Geológico Colombiano)

Según Ochoa et al (2014), en las planchas 197 y 198 la geoforma principal es una penillanura caracterizada por procesos de disectación por caída del nivel base de los drenajes y los cambios climáticos en el cuaternario, la caída del nivel base puede estar sujeta a cambios por levantamientos tectónicos.

La importancia económica de la región del Vichada en cuanto a materiales geológicos (e.g. Petróleo, minerales, materiales para construcción, hidrogeología, etc) está asociada con los escudos precámbricos (e.g. Escudo de la Guyana), Rocas sedimentarias del Terciario y a los grandes depósitos no consolidados (excepto la unidad Qcf) que configuran geográficamente la Sabana.

Localmente, en la plancha 197 (La Primavera) presenta actualmente un auge económico derivado de la agricultura, esto por la amplitud de la sabana y los caños con cantidades de agua explotables para su sostenimiento, sin embargo el recurso hidrogeológico es el que se resalta ya que la ubicación de depósitos cuaternarios (e.g. Pleistoceno Inferior y Medio) infrayaciendo unidades superficiales (e.g Qcf Qp, Qpe, Qe, Qll, Qac) que debido a sus características sedimentológicas (Depósitos arenosos no consolidados de buena porosidad) son reservorios de agua explotables no solo para la agroindustria sino para la

población en general. Los depósitos de Loess, así como los depósitos Qll restringidos a las divisorias de agua son una fuente generosa de suelos de gran utilidad para la agricultura, el espesor de estos depósitos favorece esta posibilidad de desarrollo.

3.4 Hidrografía y clima

La red hidrográfica del departamento de Vichada está conformada por los grandes ríos, quebradas, caños y algunas lagunas, desagua en el Orinoco por intermedio de los ríos Meta, Vichada, Guaviare y Tomo; además de las corrientes mencionadas, se destacan los ríos Bitá, Tuparro, Uvá, Elbita, Muco, Iteviare y Siare, y los caños Tuparrito, Bravo y Mono. Las lagunas de mayor importancia son las de Sesama y Caimán. (Alcaldía de la Primavera, 2018). El territorio corresponde a la región de los Llanos Orientales, en ella se distingue cuatro conjuntos fisiográficos denominados la llanura aluvial de desborde de la Orinoquia, mal drenada, la altillanura de la Orinoquia, bien drenada, la franja de aluviones de los grandes ríos y el escudo Guayanés. El primero está formado por bajos, playones ubicados al norte en los municipios de Puerto Carreño y La Primavera, cubiertos por vegetación de sabana y temporalmente inundables. (Alcaldía de la Primavera, 2018).

Debido a la situación ecuatorial de la Orinoquia, el territorio departamental está bajo la influencia de los vientos alisios del noreste y sureste y por la zona de convergencia intertropical (ZCIT). Se distingue tres áreas pluviométricas: la más seca, al norte del departamento en límites con los departamentos de Arauca y Casanare, una franja intermedia al centro y norte del territorio y la más lluviosa al sur. Sus tierras están comprendidas en el piso térmico cálido, donde la temperatura media anual sobrepasa los 25°C. (Alcaldía de la Primavera, 2018).

En general el departamento del Vichada se caracteriza por presentar un clima tropical seco con una humedad promedio del 80%, principalmente en la zona sur del departamento. Se aprecian dos periodos climáticos bien definidos: Uno de invierno, comprendido entre los meses de abril y noviembre, donde junio y julio corresponden a los más lluviosos y otro seco que va de diciembre a marzo, donde marzo es el mes más seco, cuyo comportamiento indica que la zona está dominada por un régimen de lluvias básicamente monomodal. Por otra parte, el índice pluviométrico promedio es de 2466.9mm anuales, con un promedio diario de 6.8mm. (Servicio Geológico Colombiano, 2014)

4.Desarrollo de la investigación

4.1 Tipo de investigación

Acorde a la modalidad de trabajo final del plan de estudios de profundización del programa curricular de Maestría en Ingeniería - Geotecnia de la Facultad de Ingeniería de la Sede Bogotá (según Resolución 165 de 2009 de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá), este trabajo escrito pretende mediante la presentación y análisis de resultados de una serie de pruebas de ensayos de laboratorio, el estudio de algunas generalidades del sector en un área de estudio definida, desarrollar un tipo de investigación descriptiva y experimental, teniendo en cuenta que uno de los objetivos es evidenciar, en laboratorio, el comportamiento de los materiales pétreos de la región frente a diferentes ensayos que definirán su desempeño frente a las condiciones climáticas desfavorables de la zona.

La línea de investigación establecida, acorde al programa curricular de Maestría en Ingeniería - Geotecnia, es “Relaciones Constitutivas de Suelos, Rocas y Materiales a Fines” dentro de la cual se enmarca el presente trabajo y su frente estratégico “Materiales y Pavimentos”.

4.2 Diseño metodológico de la investigación

Para el desarrollo de la presente investigación y el logro de los objetivos planteados, se utilizó como plan metodológico lo descrito en las siguientes fases, las cuales permitirán generar un reconocimiento del terreno, una definición del área de estudio y posterior evaluación de las propiedades geomecánica del material propio del sector en condiciones naturales y/o mejoradas:

- Fase de recopilación de información del sector y de logística

Cuyo objetivo radica en la definición y localización del proyecto, se establece el sector de análisis u área de estudio, se definen las actividades del programa exploratorio y de muestreo, se retroalimenta sobre las condiciones climáticas y de tipo del subsuelo de la región, se establecen la logística de traslado de personal y transporte de muestras, se comunica a las entidades municipales sobre la visita al sector.

- Fase exploratoria y de muestreo (In situ)

Actividad de campo, acorde al programa exploratorio, que pretende el reconocimiento del terreno y la toma de muestra de suelo.

- Fase de caracterización básica (microestructura y macroestructura del suelo).

Acorde al tipo de material, se establece el programa de caracterizaran básica mediante pruebas in situ y de ensayos de laboratorio, que permitan identificar el comportamiento del objeto de análisis como material para construcción para vías.

- Fase de diseño con estabilizantes y evaluación del desempeño de las mezclas.

Se evaluará el desempeño de los materiales mejorados, en función de la dosificación con cal y cemento como agentes estabilizantes, contenido de agua y energía de compactación, permitiendo identificar un formula de trabajo que optimice la mecánica del material.

- Análisis de resultados y conclusiones.

Análisis comparativo de información gráficas, tablas, entre otros, permitiendo establecer los beneficios del agente estabilizante en las propiedades iniciales del material o el deterioro de estas.

4.3 Objeto de análisis

Entendido como objeto de análisis aquellos elementos identificados y necesarios para determinar las diferentes variables de análisis, el objeto de análisis del presente alcance está compuesto de un total de 7 muestras del material granular, 4 probetas para la caracterización básica y de 30 probetas para la fase de diseño con estabilizantes y evaluación de desempeño, materiales procedentes del apique No. 5 (Figura 4-1).

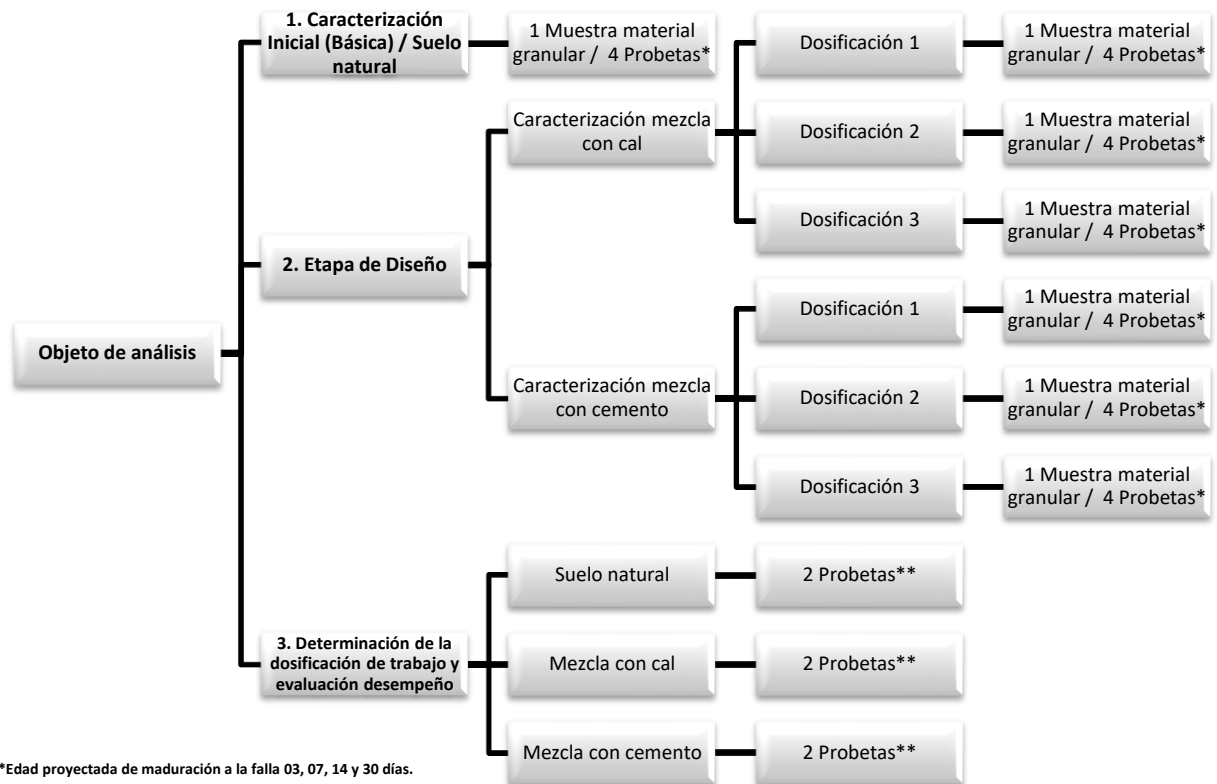


Figura 4-1. Objeto de análisis. (Elaboración propia)

4.4 Plan de ensayos y pruebas de laboratorio

En la Figura 4-2 se presenta el plan de ensayos de laboratorio establecido para las diferentes fases de la metodología de la investigación, con referencia de algunos parámetros de análisis basa en los lineamientos para suelos finos (materiales utilizado para terraplén) según Especificaciones Generales de Construcción del Instituto Nacional de Vías – INVIAS; diferenciando una etapa de caracterización inicial (básica), una de diseño para cada mejorador y/o estabilizante y una última de evaluación de desempeño.

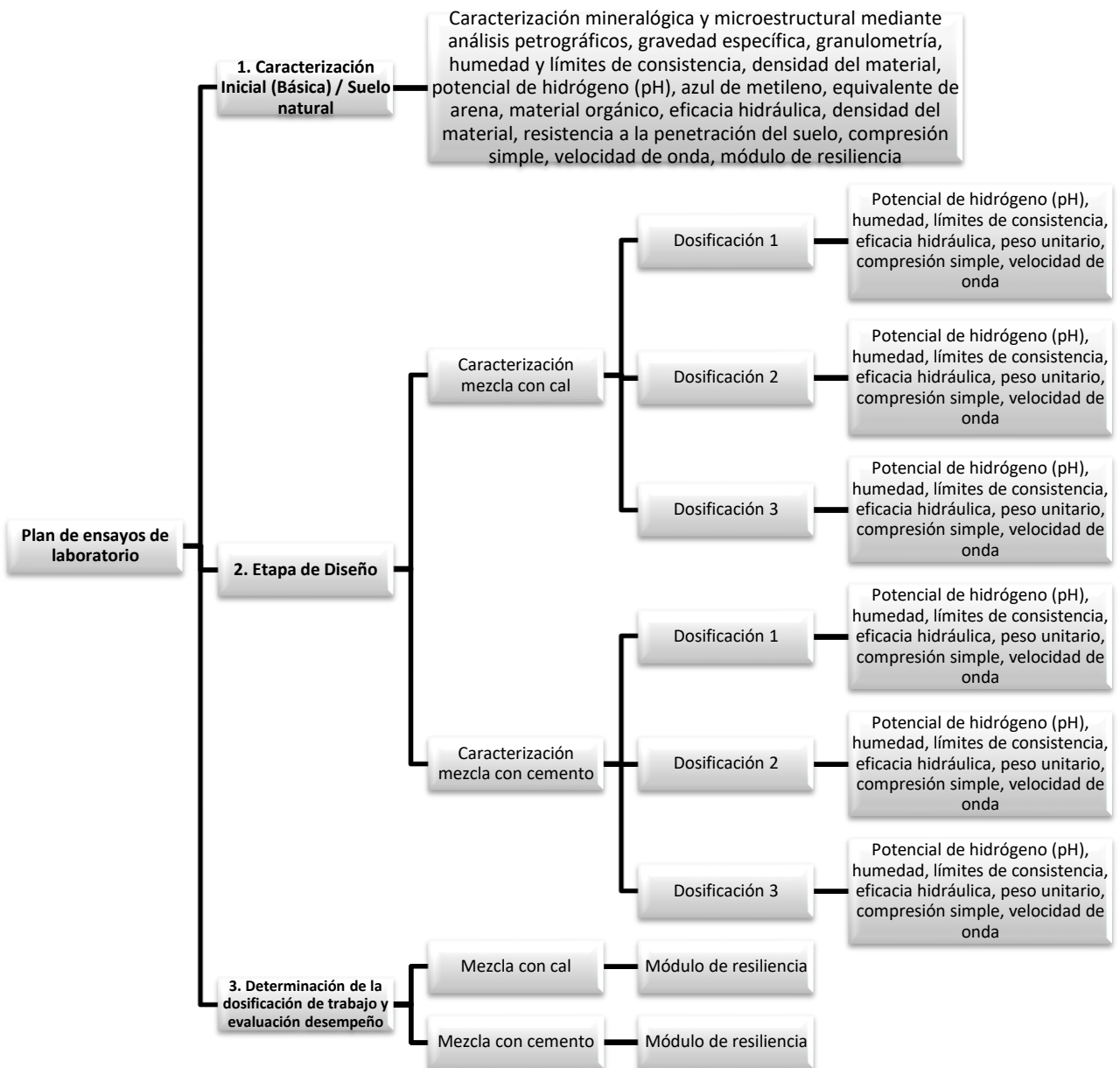


Figura 4-2. Plan de ensayos de laboratorio. (Elaboración propia)

La determinación de las variables de investigación que se utilizan para las fases de caracterización básica (microestructura y macroestructura del suelo), diseño con estabilizantes y evaluación de desempeño, se logran mediante la implementación de las normas y/o pruebas de ensayos descritos en el anexo A “Normas particulares y/o pruebas de ensayos”.

5. Campaña experimental

5.1 Fase exploratoria y de muestreo (In situ)

Durante la visita exploratoria al área de estudios en compañía de estudiantes de la Maestría en Ingeniería - Geotecnia, realizada del 30 de mayo al 04 de junio de 2014, se ejecutaron siete (7) apiques con profundidades entre 0.60m y 2.00m referenciados como: APQ 01, APQ 2, APQ 3, APQ 4, APQ 5, APQ 5A y APQ 6, se tomaron muestras alteradas e inalteradas del material pétreo y la realización de pruebas de penetrómetro dinámico de cono – PDC.



Figura 5-1. Apique No. 01 y 06. (Elaboración propia)



Figura 5-2. Apique No. 02. (Elaboración propia)



Figura 5-3. Apique No. 03. (Elaboración propia)



Figura 5-4. Apique No. 04. (Elaboración propia)



Figura 5-5. Apique No. 05. (Elaboración propia)



Figura 5-6. Apique No. 5A. (Elaboración propia)

Dichas muestras fueron rotuladas, embaladas adecuadamente y transportadas al Laboratorio de Geotecnia de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá.



Figura 5-7. Embalaje, rotulado y transporte de muestras. (Elaboración propia)

A continuación se relaciona, en la Figura 5-8 y Tabla 5-1, la localización para cada uno de los apiques enunciados.



Figura 5-8. Localización apiques fase exploratoria. (Fuente a partir de Google Earth)

Tabla 5-1. Localización apiques fase exploratoria. (Elaboración propia)

Apique		Coordenadas Geográficas		Coordenadas Planas (Magna Sirgas Este)	
No.	Referencia cercana	Longitud	Latitud	Este (m)	Norte (m)
APIQUE 1 y 6 (APQ 01 y APQ06)	Caño La Defensa	70° 05' 16.44" W	5° 34' 45.99" N	1.442.384	1.110.229
APIQUE 2 (APQ 02)	Caño La Trinchera	70° 07' 4.04" W	5° 32' 8.78" N	1.439.097	1.105.366
APIQUE 3 (APQ 03)	Caño El Tigre	70° 10' 50.20" W	5° 29' 19.93" N	1.432.154	1.100.121
APIQUE 4 (APQ 04)	Caño Aguas Claras	70° 17' 3.33" W	5° 31' 3.58" N	1.420.623	1.103.238
APIQUE 5 (APQ 05)	Caño Aguas Claras	70° 20' 57.16" W	5° 30' 36.41" N	1.413.415	1.102.356
APIQUE 5A (APQ 05A)	Caño Aguas Claras	70° 21' 3.75" W	5° 30' 35.52" N	1.430.439	1.102.351

Como parte de la exploración realizada y para cada uno de los apiques, se realizó una descripción visual del tipo de material encontrado, pudiendo observar en la Figura 5-9 la

estratigrafía para cada punto, con un patrón de similitud en los APQ 02, 04, 05 y 5A como un suelo tipo arcilla limosa color rojizo de consistencia media y una capa vegetal entre 0.20m y 0.40m.

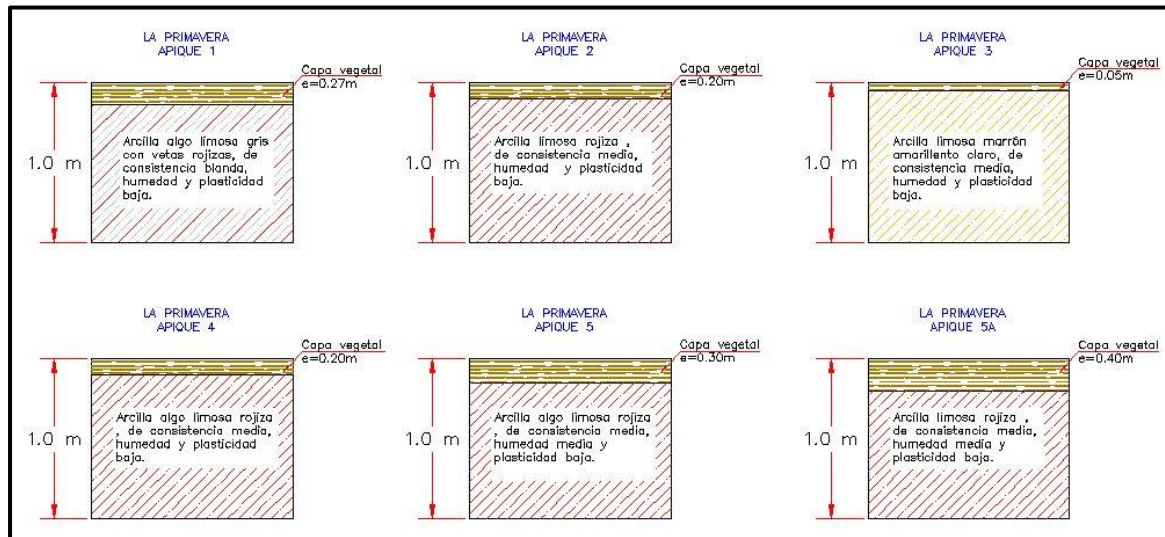


Figura 5-9. Perfil estratigráfico, según apiques. (Elaboración propia)

Dada la condición predominante de los suelos rojizos y de color marrón de similar consistencia al tacto, en gran proporción del tramo de estudios, se estableció que para el objeto de análisis definido en el numeral 4.3 y el plan de ensayos descrito en el numeral 4.4, se analizará el material del apique No. 5 (APQ 5).

5.2 Fase de caracterización básica (microestructura y macroestructura del suelo)

5.2.1 Microestructura

Caracterización mineralógica y microestructural mediante análisis petrográficos de agregados pétreos finos y gruesos, así como de DRX y Fluorescencia de Rayos X

▪ Análisis Mineralógicos por Difracción de Rayos X y Fluorescencia de Rayos X

Para la fracción fina de la muestra de suelo se adelantaron pruebas de difracción de rayos X (XRD) y fluorescencia de rayos X (XRF) buscando realizar la identificación química y mineralógica del material.

Se analiza una muestra de la fracción fina del suelo a través de difracción de rayos X, pudiéndose determinar que se compone principalmente de minerales arcillosos como montmorillonita, caolinita e Illita, seguido por cuarzo y albita (Ver Figura 5-11 y Tabla 5-2). La fracción de minerales arcillosos se asocia a la degradación de minerales más inestables de los que componen las rocas ígneas. Mientras que la fracción de cuarzo y albita tamaño arcilla se asocia a una proveniencia de los minerales formadores de las rocas descritas petrográficamente.

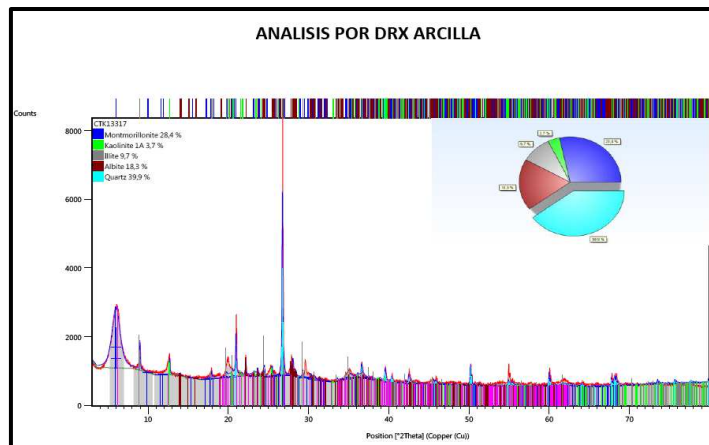


Figura 5-10. Análisis por difracción de rayos X (DRX). (Fuente prueba de ensayo de DRX)

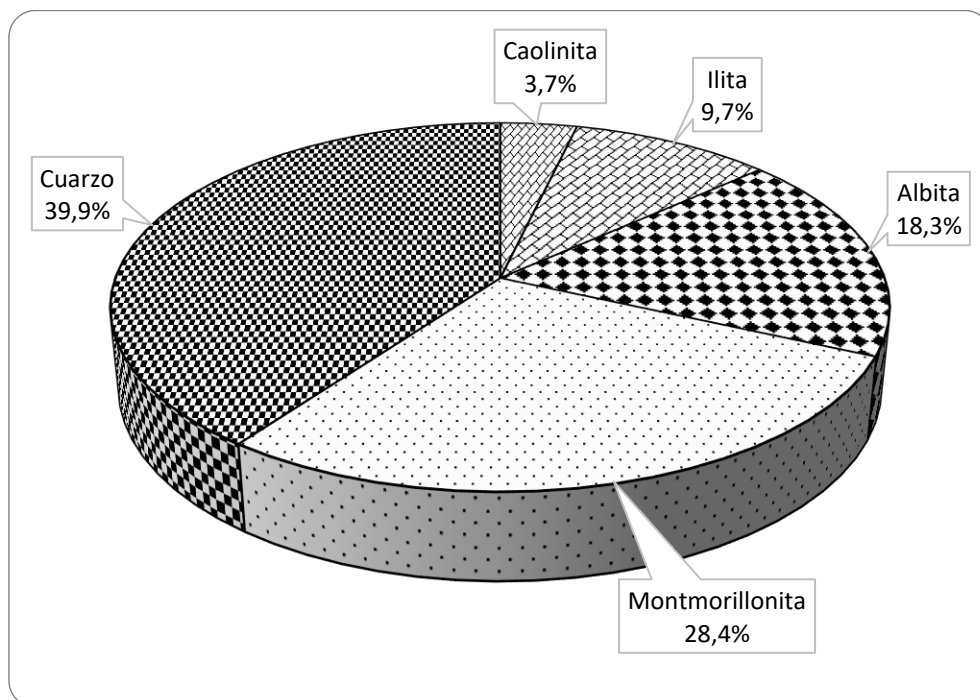


Figura 5-11. Composición según análisis por difracción de rayos X (DRX). (Fuente prueba de ensayo de DRX)

Tabla 5-2. Análisis por difracción de rayos X (DRX). (Fuente prueba de ensayo de DRX)

Grupo mineral	Composición (%)
Caolinita	3,7
Ilita	9,7
Albita	18,3
Montmorillonita	28,4
Cuarzo	39,9
Total:	100,0

Mediante el análisis de fluorescencia de rayos X (XRF), se interpretó una mineralogía asociada a la meteorización de rocas compuestas por minerales principalmente cuarzosos (Silice-SiO₂) con un 81%, seguido de aluminio - Al₂O₃(9,3%) así y en menor proporción hierro - Fe₂O₃ (3,27%) componentes formadores de las rocas ígneas, siendo congruente con lo observado en los análisis petrográficos (Ver Figura 5-12 y Tabla 5-3).

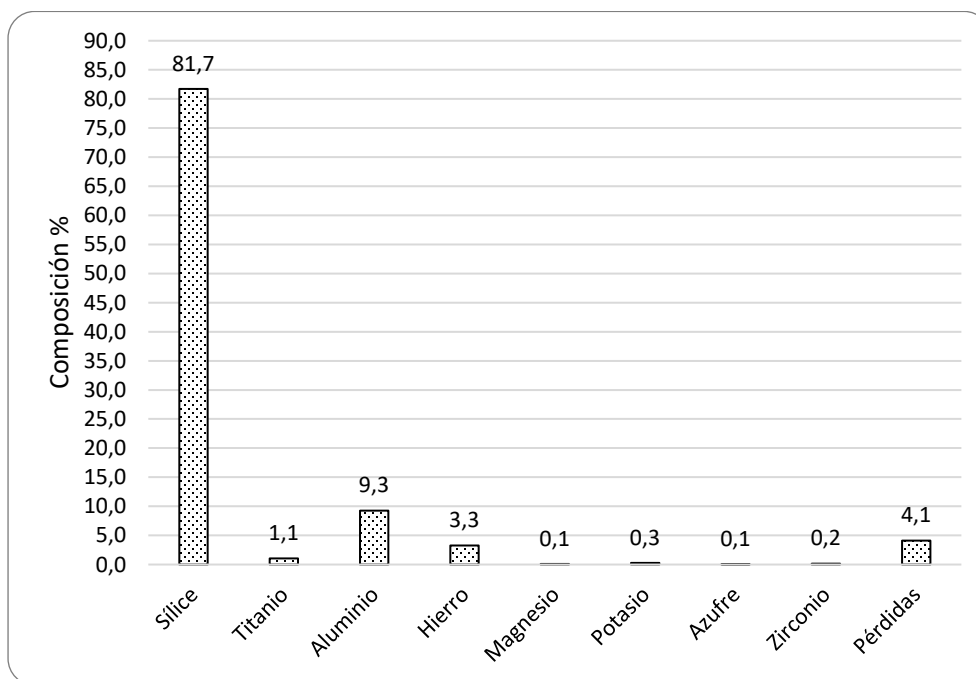


Figura 5-12. Composición según reporte de fluorescencia de rayos X (XRF). (Fuente prueba de ensayo de XRF)

Tabla 5-3. Reporte de fluorescencia de rayos X (XRF)

Nombre	Compuesto / Elemento	Composición (%)
Sílice	SiO ₂	81,7
Titanio	TiO ₂	1,1
Aluminio	Al ₂ O ₃	9,3
Hierro	Fe ₂ O ₃	3,3
Manganeso	Mn ₃ O ₄	N.D
Magnesio	MgO	0,1
Calcio	CaO	N.D
Sodio	Na ₂ O	N.D
Potasio	K ₂ O	0,3
Fósforo	P ₂ O ₅	N.D
Azúfre	SO ₃	0,1
Vanadio	V ₂ O ₅	N.D
Cromo	Cr ₂ O ₃	N.D
Estroncio	SrO	N.D
Zirconio	ZrO ₂	0,2
Bario	BaO	N.D
Níquel	NiO	N.D
Cobre	CuO	N.D
Zinc	ZnO	N.D
Plomo	PbO	N.D
Hafnio	HfO ₂	N.D
Pérdidas	LOI	4,1

N.D. : NO detectable LOI : (LOSS OF IGNTION) Pérdida por ignición a 1000°C durante una hora. El análisis corresponde a un programa cuantitativo. El resultado se reporta en base seca a 105° C. Esta técnica de análisis no descarta presencia de elementos NO reportados en concentraciones menores a 50 ppm.

▪ Análisis petrográficos macroscópicos

Al realizar la caracterización macroscópica de la muestra de suelo con el fin de conocer la composición petrográfica de los agregados que componen los depósitos cuaternarios presentes en el área de estudio que comprende el sector La Primavera - La Defensa (Caño La Defensa), principalmente los relacionados a los Depósitos de penillanura (Qp), Depósitos de penillanura eólica (Qpe) y los depósitos eólicos (Qe), se procede a realizar un tamizado de la muestra que permite dividir en tres grandes grupos granulométricos atendiendo la escala de Wentworth (1922), Douglas (1968). (ver Figura 5-13 y Figura 5-14).



Figura 5-13. Caracterización macroscópica. (Elaboración propia)



Figura 5-14. Caracterización macroscópica. Clasificación de Wentworth (1922), Douglas (1968)

Según Figura 5-13 y Figura 5-14, se observa un comportamiento bimodal en el tamaño de las partículas que conforman el suelo, desde material fino-granular asociado a fracción limo-arcillosa, pasando por arenas y una fracción de gravas predominantemente gruesas atendiendo la clasificación de Wentworth (1922), Douglas (1968). La fracción grava, es de afinidad ígnea.

Separadamente la fracción arenas de las gravas, se pudo determinar que el área de aporte de estos sedimentos es de origen ígneo tanto plutónico como volcánico.

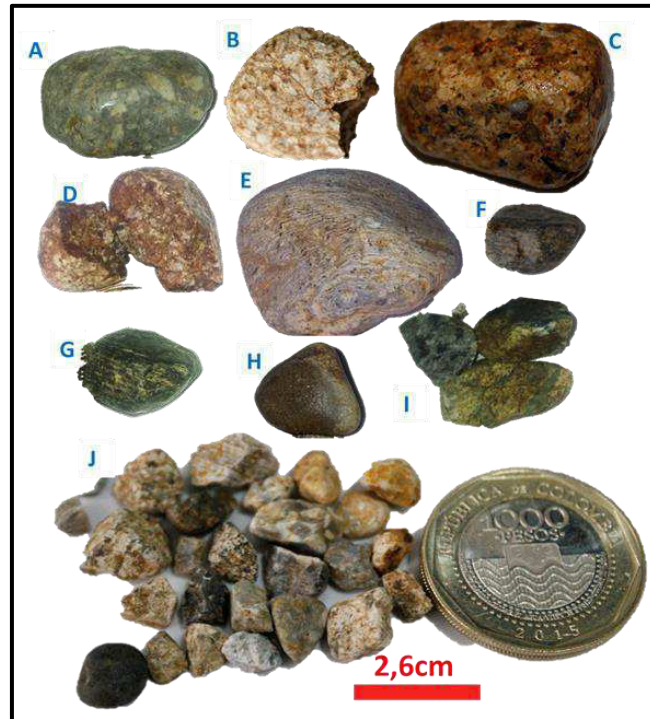


Figura 5-15. A y C. corresponden a rocas ígneas con fenocristales de feldespato y carbonatos que las hacen muy competentes; B y D corresponden a rocas ígneas que se pueden fracturar y que han perdido su resistencia debido a posible meteorización química por disolución. (Elaboración propia)

▪ Análisis petrográficos microscópicos

Con el fin de caracterizar micro texturalmente y composicionalmente la rocas que componen el depósito cuaternario se procedieron a preparar tres secciones delgadas como se muestra en la Figura 5-16, en la cual se puede ver que la Figura 5-16A corresponde a la fracción grava de fina a media y las Figura 5-16B y Figura 5-16C corresponden a las gravas media a gruesa, las cuales se debieron preparar en dos secciones delgadas debido al tamaño de las rocas, las cuales se tuvieron que cortar con disco diamantado, para poder tener una muestra representativa de las mismas.

Las secciones delgadas fueron preparadas impregnándolas con resina epóxica azul para facilitar la determinación de la porosidad, la cual en la muestra es asociada a disolución de minerales inestables como feldespatos potásicos y feldespato-plagioclasas (ver Figura 5-16B).

El material fue estudiado usando un microscopio de luz transmitida polarizada de marca Leitz Laborlux 11 POL. Las secciones delgadas fueron digitalizadas, utilizando un escáner

de alta resolución. Las fotografías fueron tomadas con una cámara CANON EOS REBEL T3.

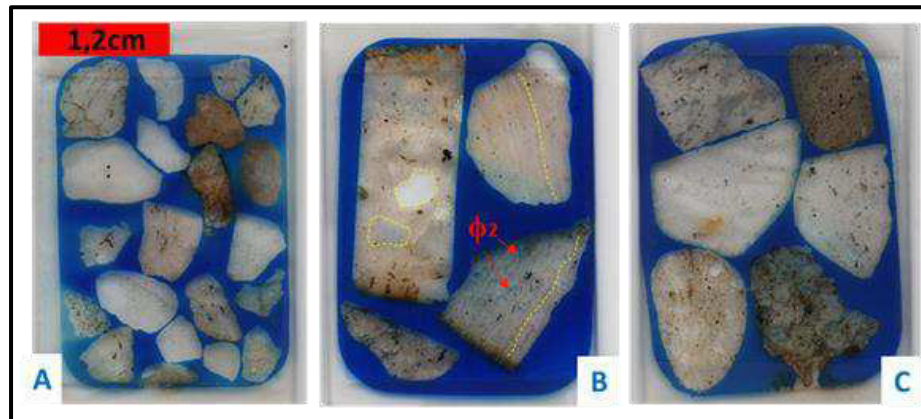


Figura 5-16. A. Se puede ver fragmentos de roca de tamaños grava fina a media; B Fragmentos de roca de tamaño Grava media a gruesa. Se destacan los granos de cuarzo y feldespato embebidos en una matriz silícea lo que los hace bastante competentes, además se señala la porosidad secundaria por disolución $\phi 2$ de minerales inestables principalmente feldespatos. Se señala a su vez la linealidad de los minerales en algunas de las rocas; C. Se puede ver en esta muestra fragmentos subredondeados y en la parte inferior derecha de esta muestra un fragmento de roca alterado, el cual corresponde a algunos agregados que se dejan fracturar con el martillo geológico a diferencia de otros que debieron ser cortados por el disco diamantado. (Elaboración propia)

▪ Análisis microscópicos (Microtextural y Composicional)

Se analizan las tres secciones delgadas enfocándose en entender la composición de los agregados y de entender el alto grado de dureza que se reportan para la mayoría de los agregados y por qué algunos tienen tendencia a ser fracturados pudiéndose separar en grupos que presentan diferentes características, principalmente micro texturales.

Rocas Ígneas Plutónicas: En la Figura 5-17 se agrupan rocas con fenocristales de cuarzo y feldespatos plagioclasas principalmente, en rocas que se clasifican como ígneas plutónicas las cuales se originan por un enfriamiento lento del magma, permitiendo la conformación de cristales de gran tamaño. En la Figura 5-17 A y Figura 5-17 B, se puede ver los minerales de cuarzo y feldespatos inalterados que le dan un mayor grado de dureza a la roca. En la Figura 5-17 C y Figura 5-17 D la cual corresponde a la misma roca con fotos tomadas en nicoles paralelos y cruzados respectivamente se puede ver el inicio de la alteración de los feldespatos los cuales en la escala de dureza de Mohs (1812) está entre 6 a 6,5 muy similar al cuarzo que está en 7, lo que la hace muy dura, aunque químicamente más inestable que el cuarzo. En la Figura 5-17 C y Figura 5-17 D se aprecia además la transformación a minerales arcillosos de estos feldespatos alterados. En la Figura 5-17 E, F y G se puede ver la presencia principal de cuarzo en la mineralogía de estas rocas.

Las rocas ígneas plutónicas para la muestra de suelo analizada presentan porcentajes aproximados de 50% de cuarzo; 45% de feldespato y 5% de minerales accesorios como pirita anfíboles y piroxenos.

Se agrupa por otro lado unas rocas muy compactas y resistentes asociadas a una mineralogía de cuarzos micro - cristalinos alineados con cuarzos de cristales milimétricos y otros de tamaño centimétricos, los cuales se aprecian en la Figura 5-18 A, B, E, F. Por otro lado, se reportan cuarzos micro cristalinos como una matriz que hospeda cuarzos y plagioclasas que también se asocian a rocas muy compactas y resistentes para uso ingenieril observadas en la Figura 5-18 C. en la Figura 5-18 D se puede ver una roca con cuarzos de extinción radial. Estas rocas se componen principalmente de cuarzos 90%, de feldespatos 5% y de minerales accesorios como pirita y hematita 5%.

Finalmente se reportan rocas de una proveniencia ígnea volcánica, los cuales permiten evidenciar el flujo del magma y los cristales de cuarzo y plagioclasas embebidos dentro de dicha matriz por demás silíceo y vítreo como se puede apreciar en la Figura 5-19.

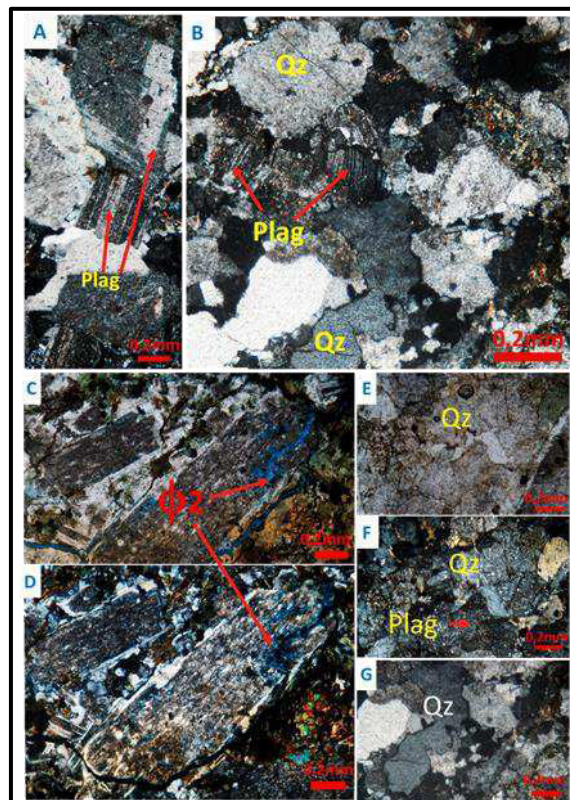


Figura 5-17. A y B, se puede ver los minerales de cuarzo (Qz) y plagioclasas (Plag) inalterados; C Roca Ígnea Plutónica en foto tomada en nicols paralelos; D. Roca Ígnea Plutónica en foto tomada en nicols cruzados en las cuales se aprecia la disolución parcial de feldespatos; E, F y G Rocas Ígneas Plutónicas. (Elaboración propia)

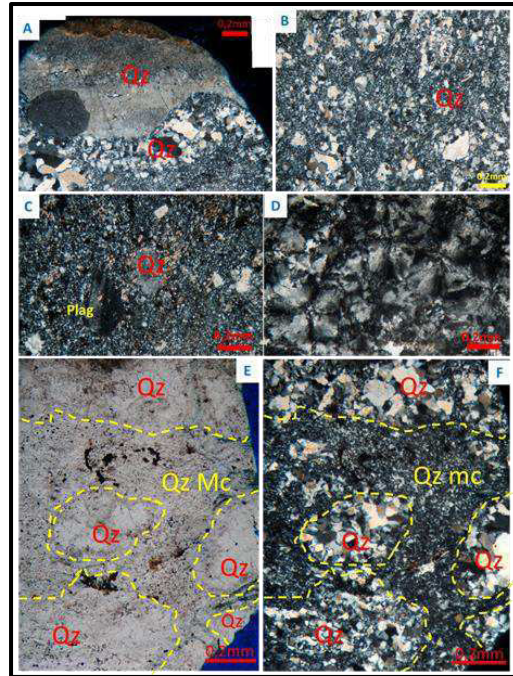


Figura 5-18. A Roca plutónica con cuarzos micro cristalino (Qz mc) a la base, seguidos de cuarzos poli cristalinos y al tope de la fotomicrografía cuarzos con cristales de gran tamaño; B. Se puede ver una roca cuarzosa con una matriz micro cristalina y parches de cuarzo con cristales de mayor tamaño; C. Matriz de cuarzo micro cristalino y cristales de plagioclasas y cuarzo embebidos en dicha matriz; D. cuarzo con extinción radial; E foto en nicoles paralelos de cuarzo microcristalino con parches de cuarzo con cristales de cuarzo de mayor tamaño; F foto de la misma roca de la figura E tomada en nicoles cruzados. (Elaboración propia)

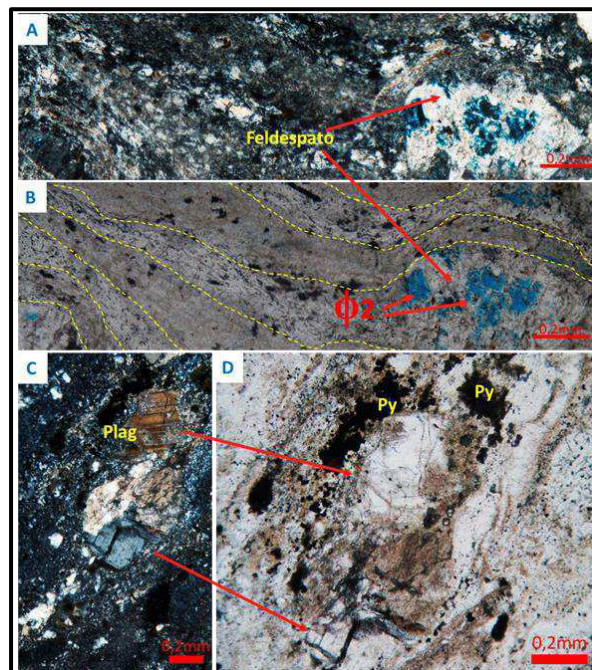


Figura 5-19. A y B, foto en nicoles paralelos y cruzados de roca de origen ígneo volcánico con matriz de cuarzo micro cristalino, en el cual hay feldespatos y cuarzos embebidos. Los feldespatos presentan disolución parcial; C y D. detalle de matriz cuarzosa y cristales mejor desarrollados de feldespato y cuarzo, se observan a su vez pirita (Py) como mineral accesorio. (Elaboración propia)

Se observan poca disolución de minerales inestables como las plagioclasas y los feldespatos potásicos. Según Clerici (1992) y Russo (1994) en Zhou et al (2014), por simplicidad las rocas blandas han sido clasificadas dentro de dos grandes grupos: Rocas blandas geológicas y rocas blandas ingenieriles. Las rocas blandas geológicas tienen propiedades intrínsecas de debilidad, disolución y expansibilidad. Las rocas blandas de ingeniería generan una tensión plástica significativa y una tensión de fluencia sometida a un efecto de ingeniería.

Algunas de las rocas estudiadas en el presente trabajo eventualmente podrían ser vistas como rocas blandas de ingeniería al verse afectadas por efecto de la meteorización llegando a generar fracturas al estar en contacto con otras rocas más compactas y ser expuestas a esfuerzo de tipo ingenieril como al ser sometidas a cargas en una vía terrestre. Por tanto, presentan buenas características petrográficas que permite ser consideradas como rocas propicias para ser usadas en obras de ingeniería al ser predominantemente cuarzosas bien compactadas y poco meteorizadas o susceptibles a la meteorización.

La composición macroscópica de la muestra de suelo analizada petrográficamente se resume en la siguiente figura:

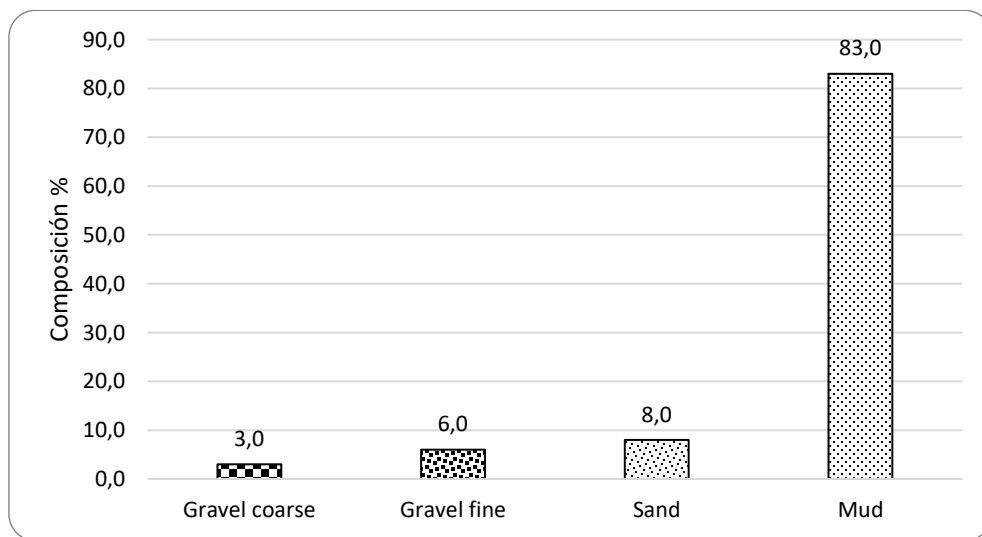


Figura 5-20. Composición macroscópica. (Elaboración propia)

5.2.2 Macroestructura

Propiedades intrínsecas

Definidos los parámetros de análisis aplicados a los suelos finos, descritos en el numeral 4.4, en Tabla 5-4 y Tabla 5-5 se relacionan a continuación los resultados de caracterización básica en desarrollo del presente trabajo y extraídos de la campaña experimental “Materiales y métodos constructivos para la estabilización de la malla vial en Colombia: una visión eficiente, económica y sostenible. Departamento del Vichada” (DROMOS-CEIBA, 2015).

Tabla 5-4. Caracterización básica de materiales. Fuente propia

Sector	Apique No.	Suelo	Color	Estado Hídrico del material							Características material fino			Gs	UCSC
				ω	L. L	L. P	IL	IP	Ic	IG	Pasa 200	Azul Metileno	Equivalente Arena		
				(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	-	(% en peso)	(mg/g)	(%)		
La Primavera - La Defensa (Caño La Defensa)	5		Rojizo	24,1	32,1	19,3	0,38	12,8	0,6	60,0	93,0%	3,5	3,0	2,78	CL

Fuente: Propia

Tabla 5-5. Caracterización básica de materiales. Fuente Proyecto DROMOS-CEIBA

Sector	Apique No.	Suelo	Color	Estado Hídrico del material							Características material fino			Gs	UCSC
				ω	L. L	L. P	IL	IP	Ic	IG	Pasa 200	Azul Metileno	Equivalente Arena		
				(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	-	(% en peso)	(mg/g)	(%)		
La Primavera - La Defensa (Caño La Defensa)	1	LP-1-A	Gris	13,6	31,4	18,0	-0,32	13,4	1,3	65,0	97,0%	2,3	3	2,69	CL
	2	LP-2-A	Café Oscuro	12,3	26,2	18,1	-0,71	8,1	1,7	24,0	59,7%	0,5	3	2,67	CL
	3	LP-3-A	Café amarillento	11,7	30,4	17,3	-0,43	13,1	1,4	47,0	79,9%	3,2	5	2,70	CL
	4	LP-4-A	Rojo	10,4	29,0	18,4	-0,75	10,6	1,8	63,0	97,5%	1,5	4	2,73	CL
	5	LP-5-A	Café fuerte	16,7	29,0	17,6	-0,08	11,3	1,1	55,0	89,1%	1,0	3	2,69	CL
	5A	LP-5A-A	Café fuerte	11,2	29,3	16,6	-0,43	12,7	1,4	49,0	82,1%	1,5	2	2,69	CL
	6	LP-6-A	Café oliva	17,6	30,8	19,6	-0,18	11,2	1,2	51,0	85,1%	1,8	2	2,78	CL

Fuente: Proyecto DROMOS-CEIBA: Materiales y métodos constructivos para la estabilización de la malla vial en Colombia: una visión eficiente, económica y sostenible. Departamento del Vichada

Se permite entonces, establecer una condición predominante en la consistencia del material analizado en gran proporción de la longitud del sector de análisis: La Primavera - La Defensa (Caño La Defensa), y cuyos valores se resumen en la Tabla 5-6. Valores límites del estado de consistencia., encontrando índice de plasticidad entre 8.1% a 13.4%.

Tabla 5-6. Valores límites del estado de consistencia. (Elaboración propia)

Características del material	Min.	Max.
Límite Líquido - L.L. (%)	26,2	32,1
Límite Plástico - L.P. (%)	16,6	19,6
Índice de Plasticidad -I.P. (%)	8,1	13,4
Pasa Tamiz No. 200 (%)	59,7%	97,5%

Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.) encontramos suelos finos tipo arcillas inorgánicas de baja plasticidad CL, con densidades en laboratorio que oscilan entre 1710.0 - 1815kg/m³ (Ver Tabla 5-7) y cuyas variaciones obedecen a la estructura granular y lo que ello implica, tal como lo describe la Tabla 5-6 donde se puede evidenciar rangos de porcentaje de material fino que pasa el tamiz N. 200 oscilando entre el 59.7% - 97.5%.

Tabla 5-7. Variación de la densidad de los Material. (Elaboración propia)

Características del material	Min.	Max.
Proctor Modificado $\gamma_{d\text{ opt}}$ (kg/m ³)	1709,8	1815,1
Humedad Optima (%)	14,7%	18,2%

El grado de plasticidad se relacionado con el tipo de mineral arcilloso que presenta un suelo, de allí la relación en la capacidad de agua absorbida de dicho material con el tipo y cantidad de minerales arcillosos; en consecuencia, Skempton (1953) definió la actividad "A" de una arcilla como la relación entre el índice de plasticidad – IP (%) del suelo y su respectivo porcentaje de fracción fina menor a 2 μ m, encontrando para nuestro caso una actividad "A" para los materiales analizados, según resultados de LL (%) y LP (%) de la Tabla 5-6, con valores menores $A < 0,75$ y clasificando como una arcilla inactiva con bajo potencial de cambio volumétrico, como se muestra en la Tabla 5-8.

Tabla 5-8. Actividad arcillas. (Elaboración propia)

Actividad (A)	Clasificación	Tipo de arcilla	Potencial de cambio volumétrico	LL (%)	LP (%)
$A < 0,75$	Inactivas	Caolinita	Bajo	35 - 100	25 - 35
$0,75 < A < 1,25$	Normales	Ilita	Medio	50 - 100	30 - 60
$> 1,25$	Activas	Montmorillonita ($A > 7,0$)	Alto	100 - 800	50 - 100

La reacción del suelo estaría influenciada también por su grado de acidez o basicidad, que influyen tanto en sus propiedades químicas como físicas. La reacción química que puede producir un suelo en contacto con un agente estabilizante se puede evaluar mediante su Potencial de Hidrogeno pH.

La escala de pH cubre un rango que oscila de 0 a 14; el valor medio de 7 es considerado como neutro, mientras que valores menores son ácidos y mayores básicos.

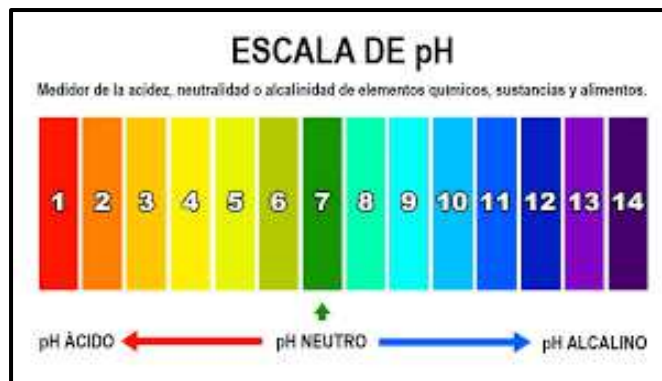


Figura 5-21. Escala Potencial de Hidrogeno – pH. (Fuente: <https://foro.portalpez.com/threads/ph.125817/>)

Según (Ortega, 1994) define, de acuerdo con rangos de pH, las condiciones de acidez o basicidad del suelo (Tabla 5-9).

Tabla 5-9. Calificación del grado de acidez o basicidad de acuerdo con el pH

Rango pH		Calificación del rango
< 4,5		Extremadamente ácido
4,6	5,0	Muy fuertemente ácido
5,1	5,5	Fuertemente ácido
5,6	6,0	Medianamente ácido
6,1	6,5	Ligeramente ácido
6,6	7,3	Neutro
7,4	7,8	Ligeramente alcalino
7,9	8,4	Medianamente alcalino
8,5	9,0	Fuertemente alcalino
> 9,0		Extremadamente alcalino

Fuente: Ortega, 1994

El grado de acidez de un suelo está relacionado a su proceso evolutivo, entre los que se destacan factores climáticos, material parental, la orgánica de sus componentes, el tiempo de evolución y el grado de eliminación de cationes.

Con apoyo de una caracterización química, se determinó el potencial de hidrógeno (pH) para el suelo natural, experimente un pH de 4.83 (Tabla 5-10), el cual según la Figura 5-21 y Tabla 5-9 describe una situación ácida.

Tabla 5-10. Potencial de hidrógeno (pH). Suelo natural. (Elaboración propia)

Material	Valor pH
Suelo natural:	4,83

En lo que respecta a la condiciones de limpieza, materia orgánica y/o de presencia partículas perjudiciales o cantidad de material potencialmente dañino, según las pruebas de azul de metileno con resultados entre 0.5 – 3.5mg/g y de materia orgánica en porcentaje de perdida por ignición del 2.0%, ver Tabla 5-11, podemos considerar el material como de baja actividad, cotejando lo descrito en anteriormente.

Tabla 5-11. Indicador de limpieza y partículas dañinas del material. (Elaboración propia)

Características del material	Min.	Max.
Azul Metileno (mg/g)	0,5	3,5
Materia Orgánica (%)	-	2,0

En comparación con el Artículo 220-13 Terraplenes de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras (INVIAS, 2013), ver Tabla 5-12, y según recomendaciones para los materiales a utilizar en la conformación de dichas estructuras (Corona, Núcleo y Cimiento), los materiales caracterizados para el presente proyecto, en condiciones naturales, no estarían acordes a las recomendaciones enunciadas.

Tabla 5-12. Requisitos de los materiales para terraplén. (Fuente Artículo INVIAS 220-13)

Característica	Norma de Ensayo	Suelos seleccionados	Suelos adecuados	Suelos tolerables
Partes del terraplén a las que se aplican		Todas	Todas	Cimiento y Núcleo
Tamaño máximo, mm	E 123	75	100	150
Porcentaje que pasa el tamiz de 2 mm (No. 10) en masa, máximo	E 123	80	80	-
Porcentaje que pasa el tamiz de 75 μ m (No. 200) en masa, máximo	E 123	25	35	35
Contenido de materia orgánica, máximo (%)	E 121	0	1.0	1.0
Límite líquido, máximo (%)	E 125	30	40	40
Índice de plasticidad, máximo (%)	E 126	10	15	-

Fuente: Extraído de la Tabla 220-1 Especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías - INVIAS (2013).

Propiedades hidráulicas

▪ Eficacia hidráulica

El tamaño y distribución de las partículas, la porosidad y tamaño de poros, grado de saturación y la electronegatividad en las partículas, afectan la capacidad de energía del suelo para retener y atraer moléculas de agua a la matriz de suelo. Situación interesante de evaluar para determinar los incrementos en la humedad de equilibrio para los suelos compactados, además de los ciclos de humedecimiento y secado que se puedan experimentar con los diferentes ciclos climáticos; lo que ameritarían una mayor profundización y así evaluar el comportamiento de los suelos parcialmente saturados en el Vichada y en particular el área de estudio del presente trabajo.

Correspondiente a la prueba de eficacia hidráulica, para evaluación de la capacidad de retención de agua (absorción y succión), y para los suelos bajo condiciones de humedad óptima y densidad máxima seca, se procede a determinar la absorción y succión de agua para el suelo natura, encontrando los siguientes resultados (Tabla 5-22)

Tabla 5-13. Capacidad de retención de agua suelo natural. (Elaboración propia)

Material	Tiempo (días)	Absorción Acumulada (%)	Succión (gr/cm ²)
Suelo Natural	7,0	5,19%	1,0469

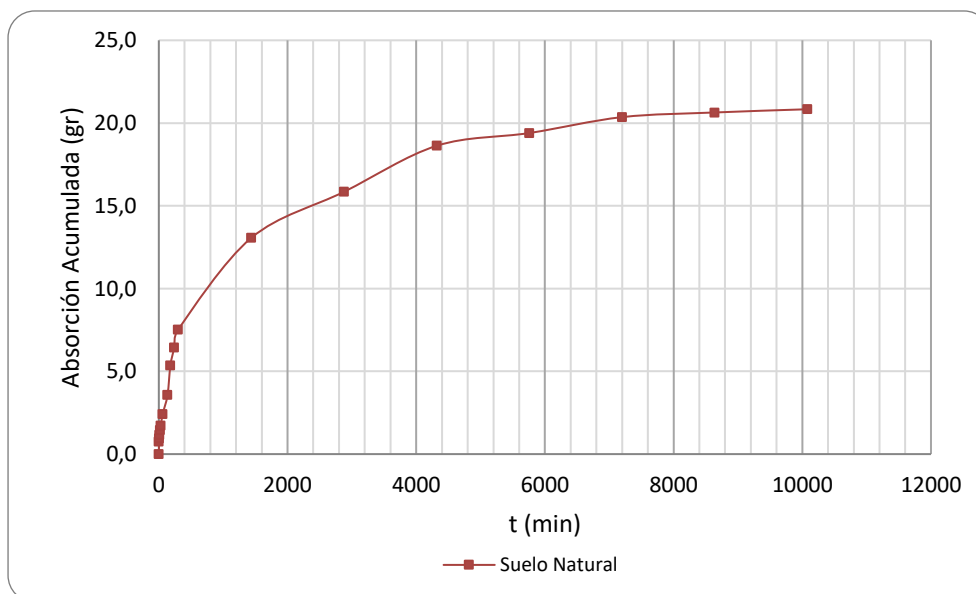


Figura 5-22. Capacidad de retención de agua (Absorción). Suelo natural. (Elaboración propia)

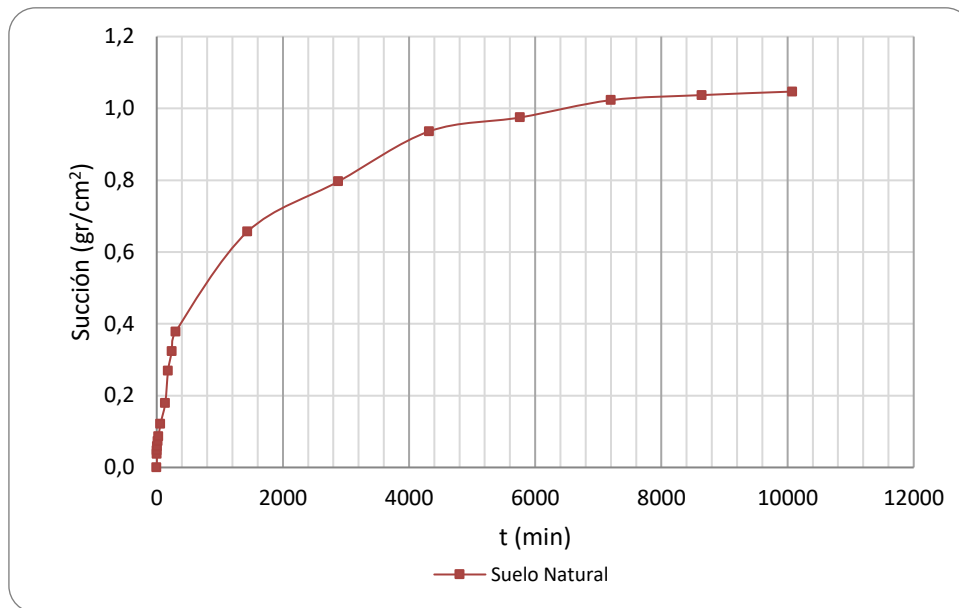


Figura 5-23. Capacidad de retención de agua (Succión). Suelo natural. (Elaboración propia)

Propiedades mecánicas

▪ Densidad del material

Como resultado de la compactación que admiten los suelos analizados, se determinó mediante la prueba de proctor modificado la densidad máxima seca de los materiales y su respectiva humedad de compactación, tal como se describen la Tabla 5-14.

Tabla 5-14. Densidad máxima seca del material. (Elaboración propia)

Apique No.	$\gamma_{d,max}$ (kg/m³)	ω_{opt} (%)
1	1778,4	15,0%
2	1756,4	16,1%
3	1709,8	18,2%
4	1815,1	14,7%
5	1771,7	15,5%

▪ Resistencia a la penetración del suelo

A fin de determinar el comportamiento a la resistencia in situ de los suelos enfoque del presente análisis (APQ5), y considerando las pruebas realizadas de penetrómetro dinámico de cono, se estableció mediante norma de ensayo I.N.V. E – 172 (INVIAS, 2013) el C.B.R. mediante el “Índice PDC” y regresión recomendada en Tabla No. 172-2 de la norma enunciada (Ver Ecuación 5-1)

$$C.B.R (%) = 292 (PDC)^{-1.12} \text{ Ecuación 5-1}$$

Como resultados del ensayo de penetrómetro dinámico de cono, se establecieron las siguientes graficas de variación del C.B.R. (%) Vs Profundidad (cm) (Figura 5-24 y Figura 5-25):

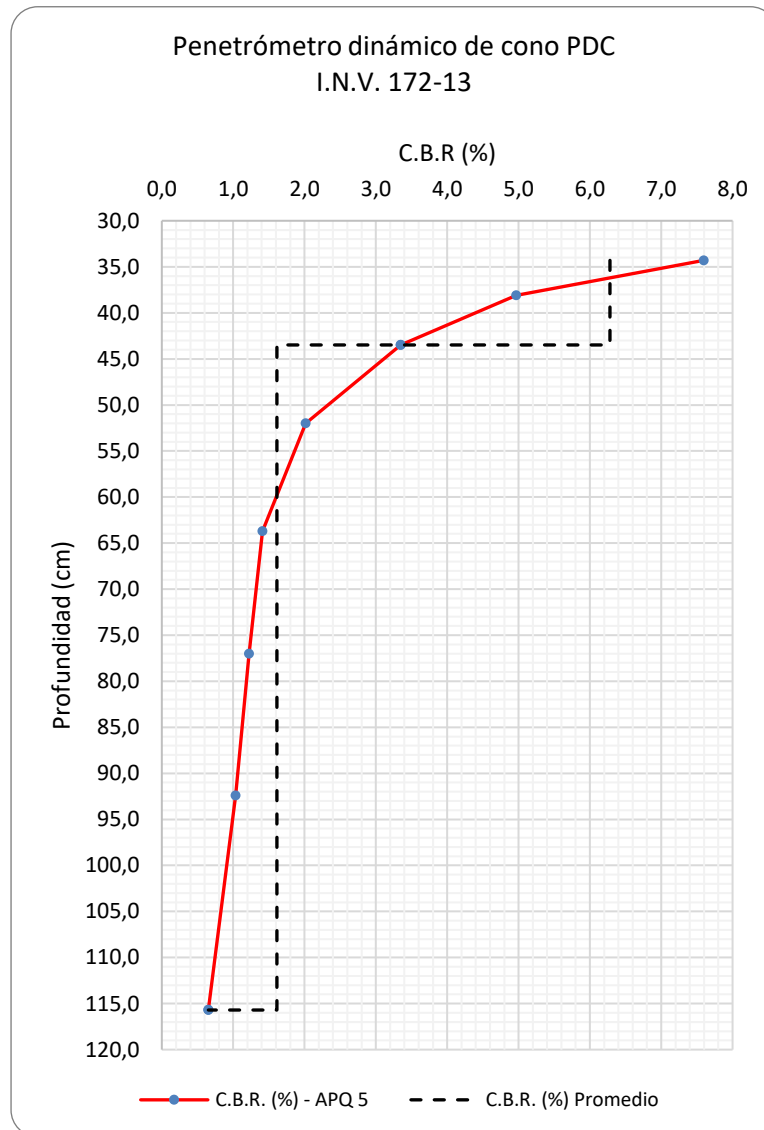


Figura 5-24. Variación C.B.R. (%). APQ No. 5. (Elaboración propia)

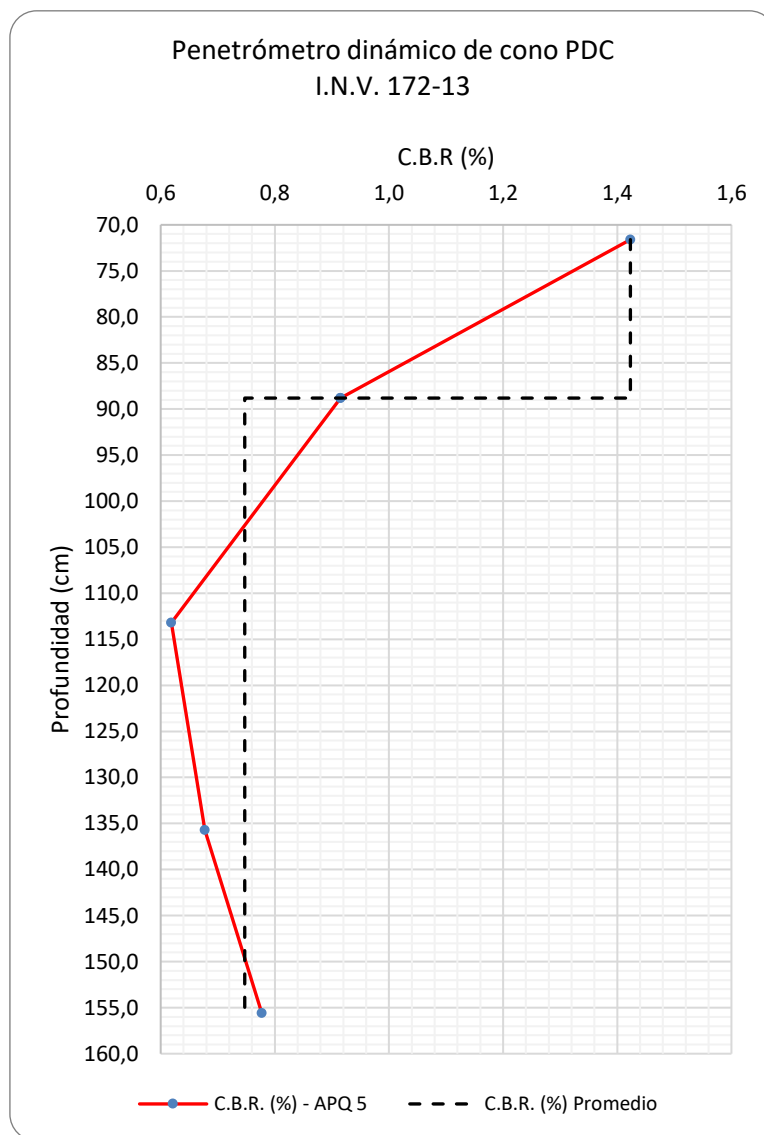


Figura 5-25. Variación C.B.R. (%). APQ No. 5. (Elaboración propia)

Tabla 5-15. Variación del C.B.R.(%) con la profundidad, según Apique. (Elaboración propia)

Apique	Profundidad (m)	C.B.R. Promedio (%)
APQ 05	0,34 - 0,44	6,3
	0,44 - 1,15	1,6
	1,15 - 1,50	0,7

Fuente: Elaboración propia

Mediante Tabla 5-15 se describen los valores de resistencia a la penetración promedio. Hallando resistencias promedio, para el APQ 05, entre el 6.3% a 0.7% a profundidades de 0.30m a 1.50m.

▪ Elaboración, descripción de muestras (probetas) y pruebas de compresión simple

Con referencia en la caracterización básica del materia, las propiedades de compactación (densidad máxima seca 1771.7kg/m^3 y humedad óptima de 15.5%, Tabla 5-14) y con aproximadamente 5.0cm de diámetro y 10.0cm de longitud, acorde a lo establecido en anexo A “Normas particulares y/o pruebas de ensayos” para la fabricación de probetas, se elaboraron 4 probetas con suelo natural (numeral 4.3 Objeto de análisis); pretendiendo con ello realizar pruebas de ensayos a edades aproximadas de maduración de 3, 7, 14 y 30 días. Se resume en la Tabla 5-17, los datos característicos para cada una de las probetas fabricadas.

Tabla 5-16. Elaboración probetas. Suelo natural. (Elaboración propia)

Material	Probeta No.	Fecha Elaboración
Suelo natural	25	martes, 27 de octubre de 2015
	26	martes, 27 de octubre de 2015
	27	martes, 27 de octubre de 2015
	28	sábado, 07 de noviembre de 2015

Tabla 5-17. Datos característicos probetas No. 25 a 28. Suelo Natural. (Elaboración propia)

Probeta No.	25	26	27	28
Material	Suelo Natural	Suelo Natural	Suelo Natural	Suelo Natural
Fecha Elaboración	27-oct-15	27-oct-15	27-oct-15	7-nov-15
Compactación %	99,8%	99,9%	100,0%	99,8%
Humedad Elaboración Probeta (%)	16,5%	16,3%	17,3%	15,5%
Longitud Inicial Probeta (mm)	99,94	100,08	99,20	101,44
Diámetro Inicial Probeta (mm)	49,97	49,99	49,92	49,86
Área Inicial Probeta (mm^2)	1961,14	1962,45	1957,48	1952,52

Datos Proctor $\gamma_{d,\max}$ (gr/cm^3)

1,77

ω_{opt} (%):

15,5

Elaboración propia

Es importante conocer el comportamiento de los suelos sometidos a cargas, para este tipo de prueba evaluaremos la respuesta mecánica del suelo en condición uniaxial.

Para el suelo natural según Tabla 5-18, podemos considerar según las edades de maduración de 3 a 37 días, que los resultados de resistencia a compresión simple oscilan entre $2.06 - 4.08 \text{ kg/cm}^2$ (206 - 408 kPa) los cuales incrementan proporcionalmente a la

edad de curado, y que según Tabla 5-19 el suelo natural presenta una consistencia de muy firme a dura.

Tabla 5-18. Resultados compresión simple. Suelo natural. (Elaboración propia)

Probeta No.	25	26	27	28
Material	Suelo Natural	Suelo Natural	Suelo Natural	Suelo Natural
Edad de Falla (días)	3	9	14	37
Carga Máxima (kg)	41,72	48,05	50,23	81,27
Esfuerzo Máximo (kg/cm²)	2,06	2,39	2,50	4,08
Esfuerzo Máximo (kPa)	206,00	239,00	250,00	408,00
Deformación Axial a la Falla (%)	3,32	2,49	2,47	2,04
Deformación Axial Máxima (%)	5,00	3,53	4,05	2,13
Datos Proctor $\gamma_{d,max}$ (gr/cm³)	1,77		ω_{opt} (%): 15,5	
Elaboración propia				

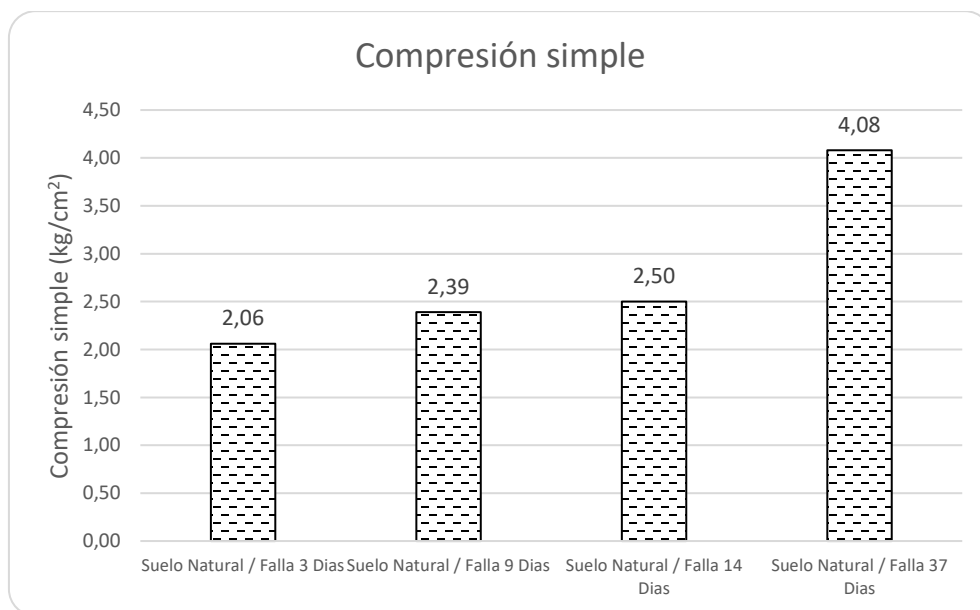


Figura 5-26. Resultados compresión simple. Suelo natural. (Elaboración propia)

Tabla 5-19. Consistencia de arcillas según resistencia a la compresión simple.

Consistencia	q_u (kN/m ²)
Muy blanda	0 - 25
Blanda	25 - 50
Media	50 - 100
Firme	100 - 200
Muy Firme	200 - 400
Dura	> 400

Fuente: Braja M. Das

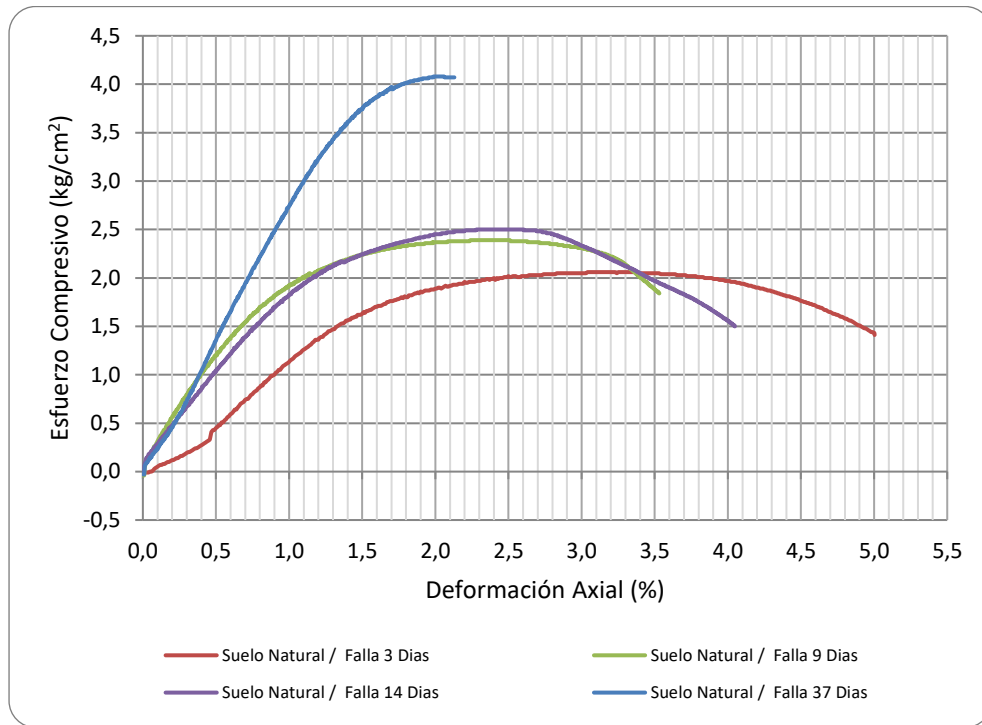


Figura 5-27. Curva Esfuerzo Vs. Deformación. Suelo natural. (Elaboración propia)

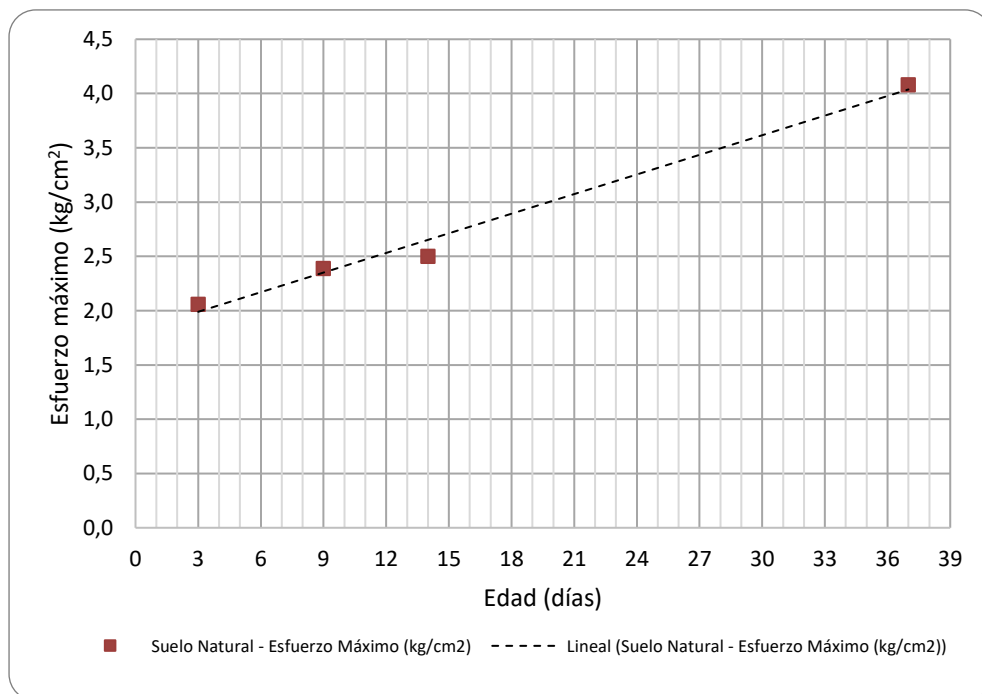


Figura 5-28. Esfuerzo máximo. Suelo natural. (Elaboración propia)

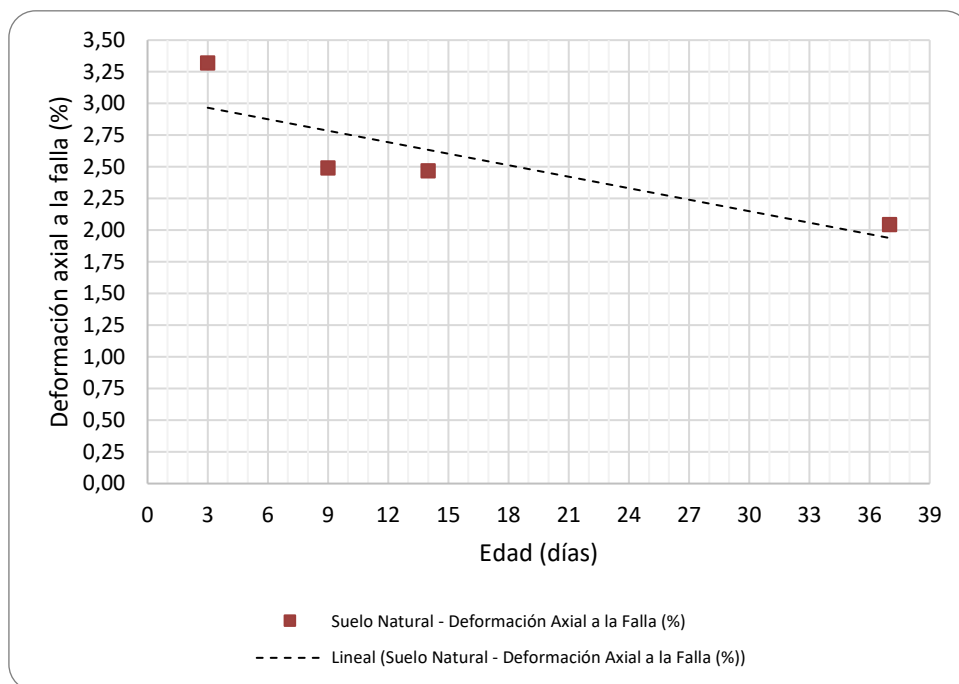


Figura 5-29. Deformación a la falla. Suelo natural. (Elaboración propia)

En la Figura 5-27 y Figura 5-28 hallamos una relación directa entre la rigidez del material frente con el periodo de maduración, observamos también una disminución de la deformación axial (Figura 5-29) con el aumento de la rigidez del material. Cambios que no son significativos entre las edades de 9 y 14 días para las cuales los valores de resistencia son similares, oscilando entre 2.39-2.50kg/cm² (239.0-250.0 kPa).

▪ Velocidad de onda (Vp)

Mediante perturbaciones mecánicas generadas por las ondas elásticas, como pruebas no destructivas aplicada a las probetas de estudio, y según el tipo de ensayo descrito en el anexo A “Normas particulares y/o pruebas de ensayos”, podemos establecer diferentes valores de velocidades de ondas P (primarias) u ondas compresionales (Vp), las cuales describen una trayectoria longitudinal resultado de la excitación del suelo, mediante compresión y dilatación en la dirección de la propagación de la onda. Como resultados, mediante pruebas de ultrasonido, se pudo obtener:

Tabla 5-20. Velocidad de onda. Suelo natural. Edad 12 días. (Elaboración propia)

Probeta No.	Material	Edad (días)	Compactación (%)	Carga máxima (kg)	Esfuerzo máximo (kg/cm ²)	Deformación axial a la falla (%)	Vp (m/s)
28	Suelo Natural	12	99,8%	50,23	2,50	2,47	722

La carga y esfuerzo máximo corresponden a los resultados de compresión simple
Elaboración propia

Tabla 5-21. Velocidad de onda. Suelo natural. Edad 37 días. (Elaboración propia)

Probeta No.	Material	Edad (días)	Compactación (%)	Carga máxima (kg)	Esfuerzo máximo (kg/cm ²)	Deformación axial a la falla (%)	Vp (m/s)
28	Suelo Natural	37	99,8%	81,27	4,08	2,04	1027

La carga y esfuerzo máximo corresponden a los resultados de compresión simple
Elaboración propia

Para nuestra experiencia, según Tabla 5-20 y Tabla 5-21, y tal como se ilustra en Figura 5-30, el comportamiento de suelo natural con la edad de curado describe un incremento en las velocidades de onda de 722m/s (12 días) a 1027m/s (37 días), incremento del 42.3%.

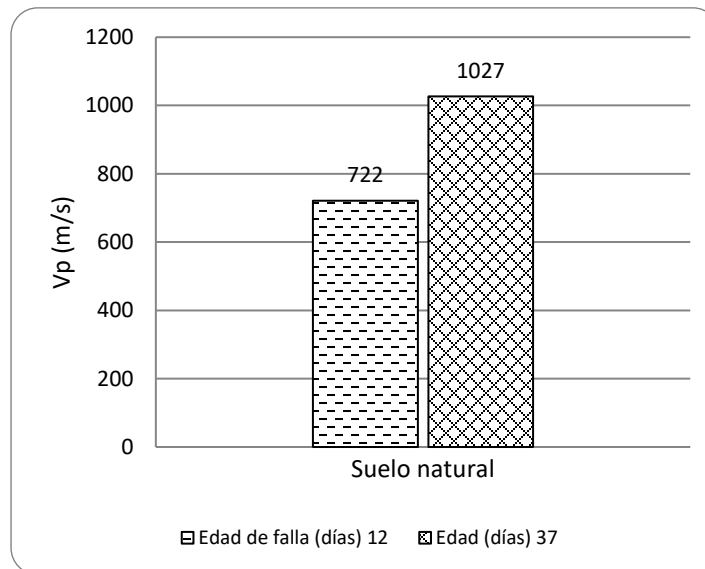


Figura 5-30. Comportamiento de la velocidad de onda. Suelo natural. (Elaboración propia)

▪ Módulo de resiliencia

Tomando la naturaleza cíclica de las cargas que actúan en los materiales de la estructura de pavimento, el tipo y la dimensión de las cargas, su frecuencia y repetición, condiciones climáticas y localización de las diferentes capas de material; el comportamiento esfuerzo-deformación de un suelo puede ser resiliente y plástico. Las deformaciones resilientes o elásticas son de recuperación instantánea y suelen denominarse plásticas a aquellas que permanecen en el pavimento después de cesar la causa deformadora. Bajo carga móvil y repetida, la deformación plástica tiende a hacerse acumulativa y puede llegar a alcanzar valores inadmisibles. Paradójicamente, este proceso suele ir acompañado de una “densificación” de los materiales, de manera que el pavimento fallado puede ser más

resistente que el original. (Secretaría de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte, 2001). Con la finalidad de valuar el módulo resiliente del suelo natural, se elaboran 2 probetas con las características relacionan en la Tabla 5-22.

Tabla 5-22. Datos característicos probetas No. 29 y 32. Suelo natural (Elaboración propia)

Probeta No.	29	32
Producto Mejorador	Suelo Natural	Suelo Natural
Fecha Elaboración	08-jul-16	08-jul-16
Fecha de Falla	15-jul-16	22-jul-16
Edad de Falla (días)	7	14
Longitud Inicial Probeta (mm)	99,95	99,95
Diámetro Inicial Probeta (mm)	50,24	50,24
Área Inicial Probeta (mm ²)	1982,39	1982,39
Volumen Inicial Probeta (cm ³)	198,14	198,14
Humedad (%)	15,92%	16,13%
Peso unitario seco (gr/cm ³)	1,76	1,75
Compactación %	99,3%	99,0%

Datos Proctor $\gamma_{d,max}$ (gr/cm³)

ω_{opt} (%):

Como se puede evidenciar en Figura 5-31 y Figura 5-32, las condiciones de densidad y humedad fueron estimadas utilizando como referencia la densidad seca máxima y humedad óptima acorde a los resultados del proctor modificado expuesto en Tabla 5-14.

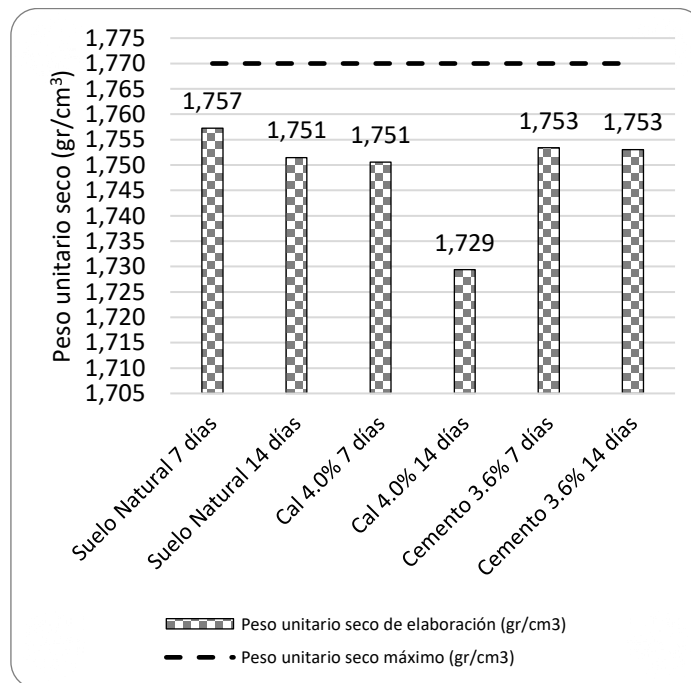


Figura 5-31. Control pesos unitarios para prueba de módulo dinámico. (Elaboración propia)

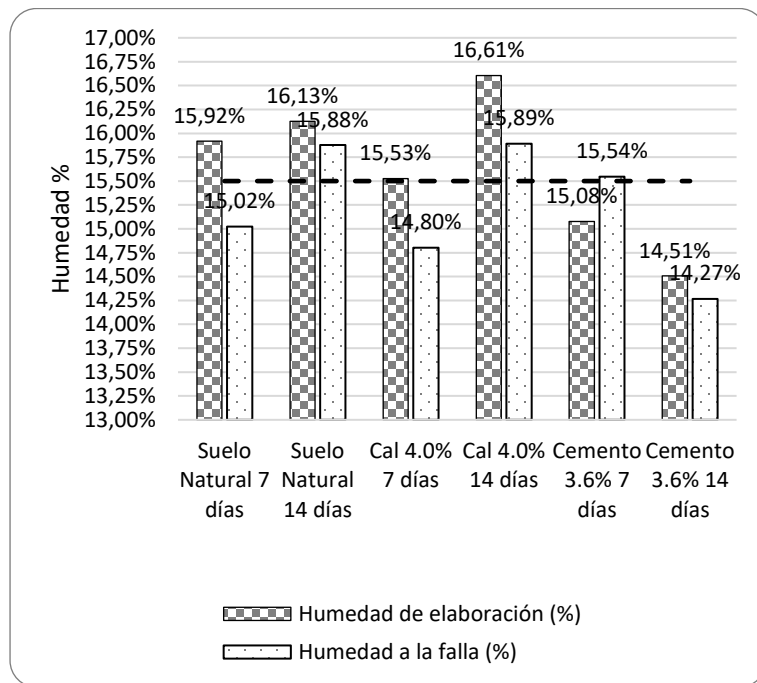


Figura 5-32. Control humedades para prueba de módulo dinámico. (Elaboración propia)

Los resultados de módulo resiliente pueden ser afectados por Número de aplicaciones y magnitud del esfuerzo desviador, tixotropía, método de compactación, densidad del material y contenido de agua, peso específico; encontrando que el módulo de resiliencia de los suelos no es una propiedad constante, sino que es dependiente de varios factores (Secretaría de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte, 2001).

Según experiencias documentadas en “Comportamiento resiliente de materiales finogranulares en subrasantes” (Rondón et. al, 2012), este concluye, que los factores que más influyen sobre la respuesta resiliente que experimentan materiales finos granulares en subrasantes de pavimentos son los esfuerzos aplicados, el contenido de agua y el estado de compactación. Materiales granulares finos bajo carga cíclica incrementan las deformaciones resilientes (rigidez disminuye) cuando se aumenta la magnitud del esfuerzo desviador aplicado y el contenido de agua, y cuando disminuye el peso unitario. En estos materiales, la influencia de la presión de confinamiento es menor en comparación con la del esfuerzo desviador. Cuando la magnitud del esfuerzo cíclico desviador incrementa, la tendencia del módulo resiliente es alcanzar un valor inferior constante el cual es utilizado en el diseño de pavimentos, Ver Figura 5-33 y Figura 5-34.

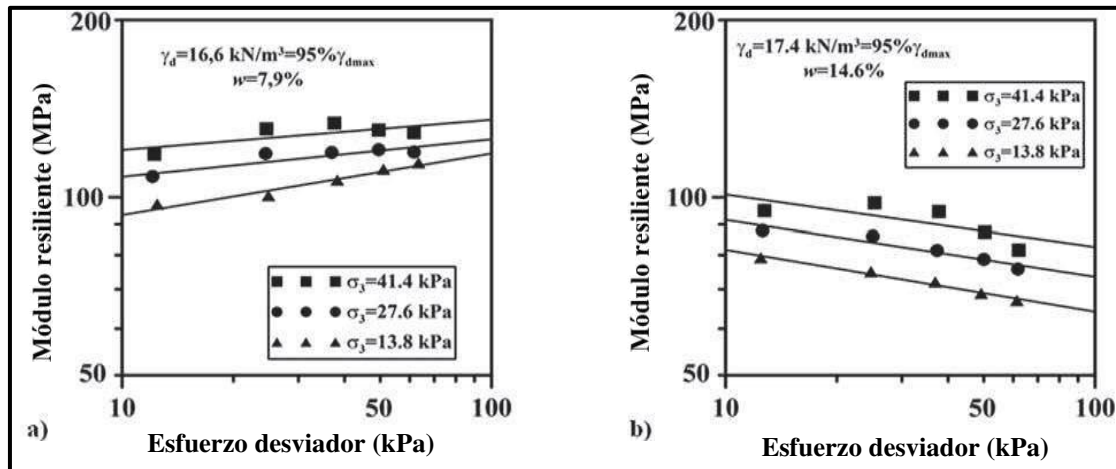


Figura 5-33. Comportamiento del M_r en una muestra de arcilla con contenido de agua a) Inferior a la Humedad Óptima y b) Superior a la Humedad Óptima. Fuente: MEPDG (2004)

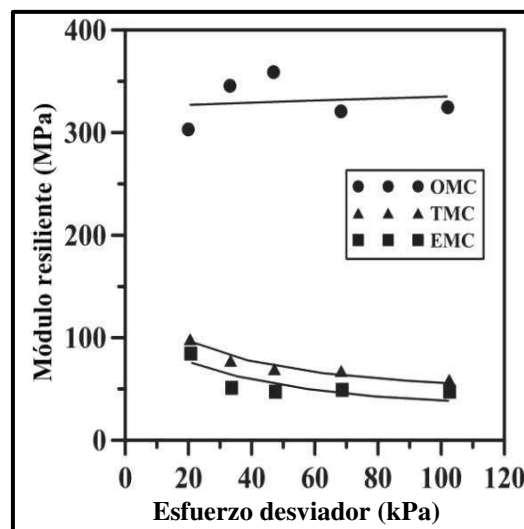


Figura 5-34. Comportamiento del M_r en una muestra de arcilla con contenido de agua OMC: Humedad inferior a la Humedad Óptima, EMC: Humedad superior a la Humedad Óptima y TMC: Humedad entre OMC y EMC. Fuente: S.R. Yang, W. H. Huang and Y. – T. Tai

También concluye Rondón et. al. (2012), que muestras fino granulares fabricadas con humedad inferior al contenido de agua óptimo especificado por el ensayo proctor tienden a experimentar mayores módulos en comparación con aquellas fabricadas con contenidos óptimos y con contenidos superiores al óptimo. En estos casos en donde el material se encuentra parcialmente saturado el efecto de la succión juega un papel importante. La rigidez incrementa cuando aumenta este parámetro, y por lo general parece existir una relación directa entre el módulo resiliente y la succión matricial para niveles de esfuerzo

pequeños. Cuando la magnitud de la succión es elevada, el módulo incrementa de manera atípica a medida que aumenta el esfuerzo desviador, Ver Figura 5-35 y Figura 5-36.

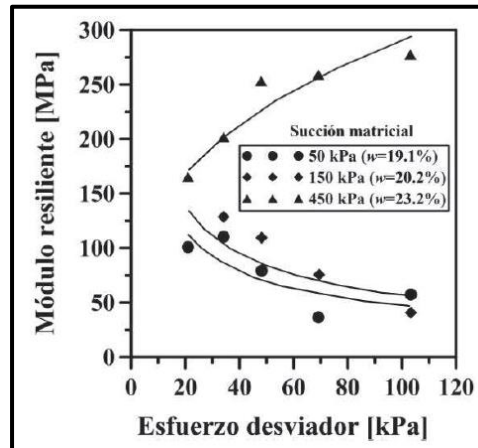


Figura 5-35. Evolución del M_r con el esfuerzo desviador y la succión. Suelo arcilloso. Fuente: S.-R. Yang, H.-D., Lin, J.H.S. Kung and W.-H. Huang

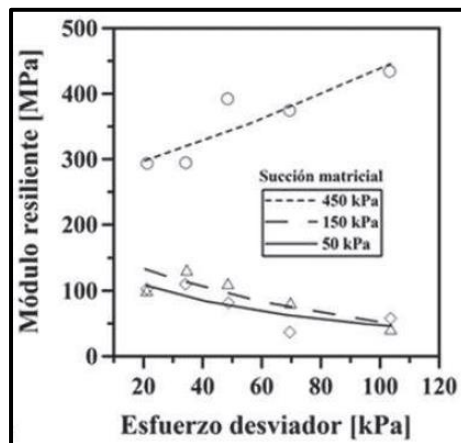


Figura 5-36. Evolución del M_r con el esfuerzo desviador y la succión. Suelos Tipo A-6. Fuente: J.H.S. Kung, H-D. Lin, S. – J. Yang and W. – H. Huang

Lo anterior puede evidenciar que los contenidos altos de agua generan disminución en la succión de los materiales, por ende, una disminución del contacto entre partículas, pudiendo establecer, que existe una condición óptima de humedad para una rigidez máxima del material.

Se describe en la Figura 5-37, para el suelo natural con una edad de curado de 7 días, un comportamiento de incremento del módulo resiliente - M_r frente al esfuerzo desviador - σ_a aplicado, los cuales a su vez se incrementan con la presión de cámara. Para los diferentes estados de presión de cámara y esfuerzo desviador durante el número de aplicaciones de carga de la prueba, se encuentran resultados de módulos resilientes entre 32.69 - 73.89Mpa. Manifestando la tendencia al comportamiento descrito en las Figura 5-35 y Figura 5-36 para suelos arcillosos con una succión alta.

Tabla 5-23 Módulo Resiliente. Suelo Natural 7 días. (Elaboración propia)

Cámara	σ_d Aplicado promedio	Módulo Resiliente σ_d/ϵ_r
kPa	kPa	MPa
41,4	18,14	63,17
41,4	11,36	42,98
41,4	18,32	60,32
41,4	23,91	69,80
41,4	30,69	73,21
41,4	37,41	73,89
27,6	15,73	37,75
27,6	20,08	50,37
27,6	24,61	57,20
27,6	31,21	64,94
27,6	38,70	73,01
13,8	13,91	32,69
13,8	19,84	40,30
13,8	25,14	44,98
13,8	32,97	53,74
13,8	39,34	60,71
	Máximo:	73,89
	Mínimo:	32,69

	Prueba de corte triaxial
Esfuerzo axial máximo (kPa)	228,67
Deformación Axial a la Falla (%)	4,121%

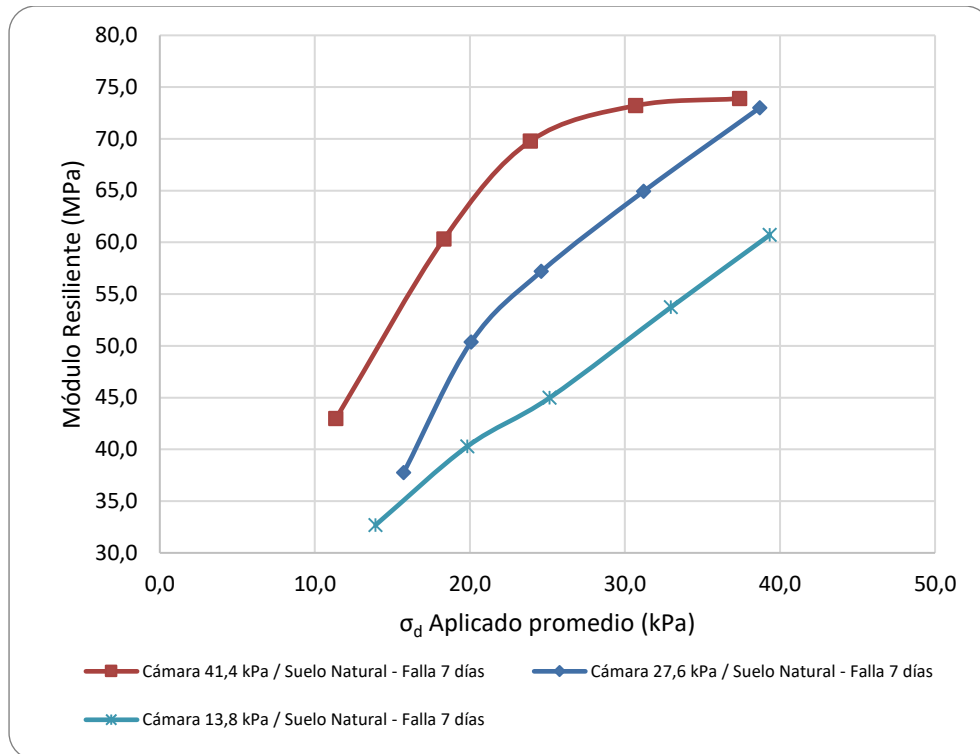


Figura 5-37. Relación entre el Módulo Resiliente y el Esfuerzo Desviador. Suelo Natural 7 días. (Elaboración propia)

Con ayuda de los valores obtenidos en *Tabla 5-15. Variación del C.B.R.(%) con la profundidad, según Apique*, y mediante Ecuación 5-2 propuesta por la AASHTO (AASHTO, 1993) para determinar el módulo resiliente de la subrasante a través de los resultados del ensayo de CBR, tenemos que para el APQ 5 a profundidades entre 0.30 – 0.44m se tendrían módulos resilientes entre 64.96 - 126.44MPa valores que estarían en un orden de proporción aceptables a los presentados en *Tabla 5-23*.

$$Mr (PSI) = 1500 \times CBR \text{ Ecuación 5-2}$$

Tabla 5-24. Mr determinado mediante CBR. (Elaboración propia)

Apique	Profundidad (m)	C.B.R. Promedio (%)	Mr (PSI)	Mr (MPa)
APQ 05	0,34 - 0,44	6,3	9422	64,96
	0,44 - 1,15	1,6	2421	16,69
	1,15 - 1,50	0,7	1121	7,73

Fuente: Elaboración propia

5.3 Fase de diseño con estabilizantes y desempeño de las mezclas

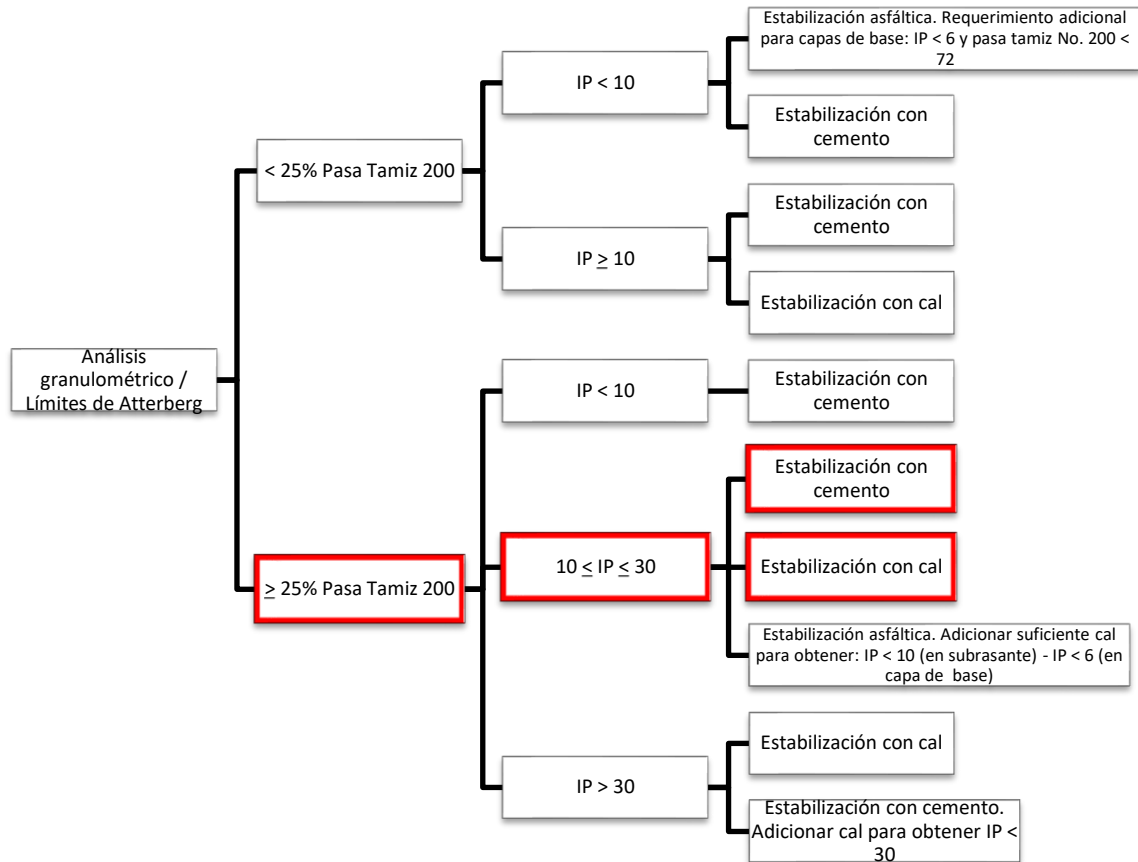


Figura 5-38. Determinación del tipo de estabilizante según P200 y el IP. (Currin et al., 1976 en Mallela et al., 2004)

Con el fin de identificar una mezcla que mejore la mecánica del material, y con ayuda de sus condiciones de índice de plasticidad y de porcentaje que pasa el tamiz No. 200, se establece como mejoradores para el presente trabajo a la *cal hidratada* y al *cemento portland*. soportado lo anterior, por la Figura 5-38 (Mallela, 2004) que ilustra una recomendación para determinar los estabilizantes adecuados según la caracterización básica del suelo.

Sumado a lo anterior, podemos considerar a la cal y al cemento portland como materiales de construcción de fácil aplicación en los procesos constructivos, bajo costo y de fácil adquisición, medianamente estables bajo condiciones de intemperismo luego de su curado y amigable con el medio ambiente.

5.3.1 Suelo mejorado con cal

▪ Dosificaciones y/o concentraciones de mejoradores

Mediante evaluación del potencial de hidrógeno (pH) para diferentes concentraciones de cal y suelo natural seco al horno, y considerado la Norma INVIAS INV E-601-13 “Estimación de la proporción de cal necesaria para estabilizar un suelo a partir de la medida del pH” (INVIAS, 2013), la cual establece el menor porcentaje de cal que da lugar a un pH de 12.4 en las mezclas de suelo : cal : agua como el porcentaje aproximado de cal para estabilizar el suelo, se determinan las concentraciones de trabajo para la presente experiencia.

Se encontró, que la concentración de cal para un pH de 12.4 oscila entre el 3.0% y 4.0%, tal como se evidencia en la Tabla 5-25. Consecuente a lo anterior, se adoptarán las concentraciones de 3.0%, 4.0% y 5.0% como dosificaciones para la etapa de evaluación del comportamiento mecánico del suelo mejorado con cal.

Tabla 5-25. Determinación pH (suelo + sal). (Elaboración propia)

No. Muestra	Concentración cal (%)	Peso suelo seco (gr)	Peso de cal (gr)	Peso suelo seco + cal (gr)	Cantidad agua (ml)	Valor pH
1	1,0%	25,0	0,25	25,25	100,00	11,30
2	2,0%	25,0	0,50	25,50	100,00	12,17
3	3,0%	25,0	0,75	25,75	100,00	12,38
4	4,0%	25,0	1,00	26,00	100,00	12,45
5	5,0%	25,0	1,25	26,25	100,00	12,50
6	6,0%	25,0	1,50	26,50	100,00	12,55
7	7,0%	25,0	1,75	26,75	100,00	12,57
8	8,0%	25,0	2,00	27,00	100,00	12,60
9	9,0%	25,0	2,25	27,25	100,00	12,61
10	10,0%	25,0	2,50	27,50	100,00	12,64
11	Solución Saturada	-	20,00	20,00	100,00	12,67
Nota:	Cal hidratada					

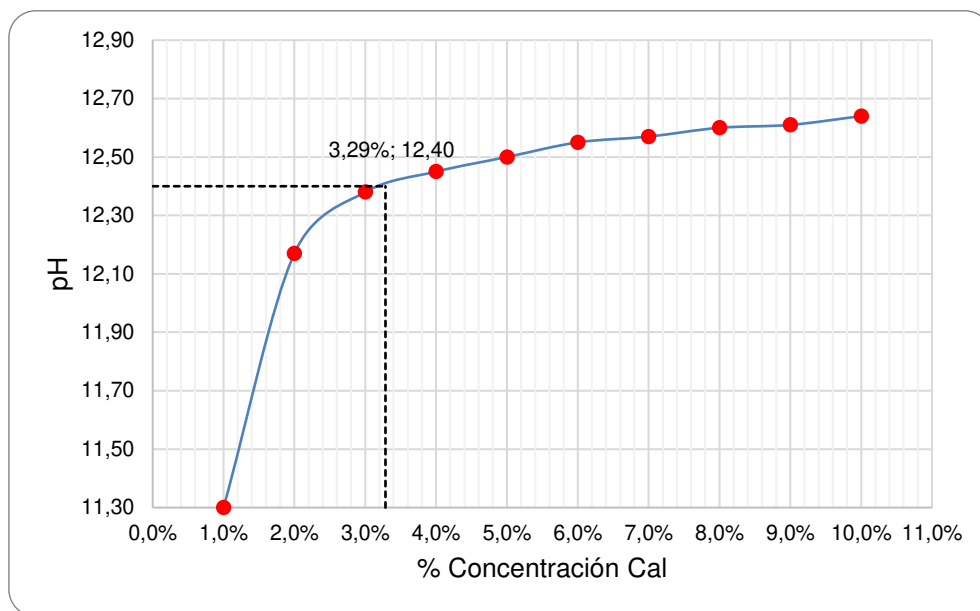


Figura 5-39. Variación del pH según concentración de cal. (Elaboración propia)

▪ Variación del potencial de hidrógeno (pH)

Para las concentraciones de cal establecidas, según lo expresado en la Figura 5-21 y Tabla 5-9, el suelo experimenta un cambio en su condición química, de una situación ácida en estado natural a una situación alcalina o básica al ser mezclado con cal, presentando un pH con valores entre 12,38 y 12,50 (Tabla 5-26 y Figura 5-40).

Tabla 5-26. Comportamiento pH (suelo + cal). (Elaboración propia)

Comportamiento pH (suelo + estabilizante)	
Material	Valor pH
Suelo natural	4,83

Concentración cal (%)	Valor pH
3,0%	12,38
4,0%	12,45
5,0%	12,50

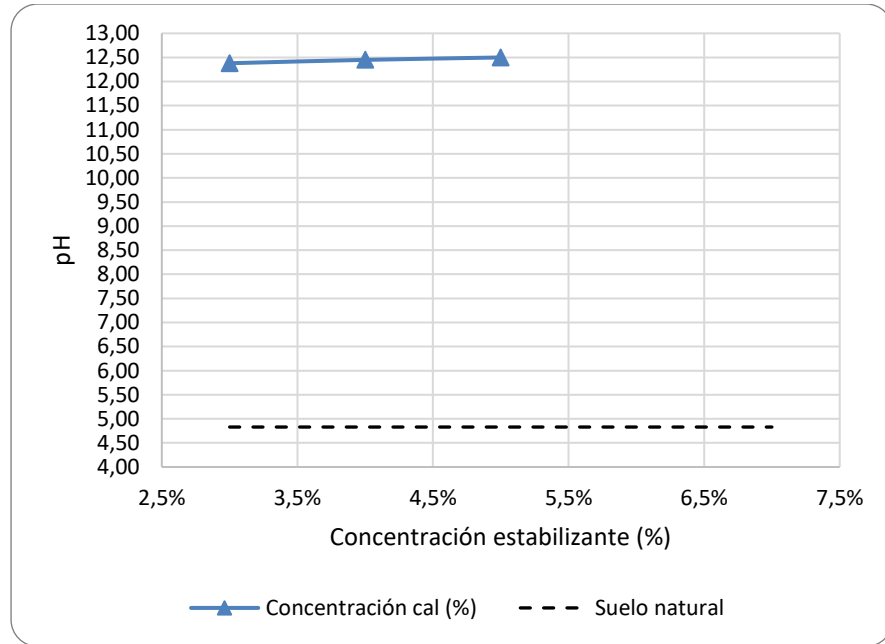


Figura 5-40. Comportamiento pH. Suelo + cal. (Elaboración propia)

▪ Humedad durante la reacción química

Como seguimiento al proceso de mezclado (suelo, cal y agua) y de reacción química, la Tabla 5-27 evidencia la pérdida de humedad con un rata promedio de 0,005% por cada minuto (0,30% / hr) (Tabla 5-28), describiendo a su vez, una tendencia cuasi lineal (Figura 5-41). Aunque siendo bajos, dichos valores pueden ser de utilidad en el proceso constructivo para lograr las humedades optimas en la compactación.

Tabla 5-27. Humedad durante la reacción química suelo + cal. (Elaboración propia)

Tiempo acumulado (min)	0	75	135	195	240
Concentración Cal (%)	Comportamiento de la humedad durante la reacción química Suelo + Cal (%)				
1,0%	19,52%	18,89%	18,62%	18,19%	17,91%
2,0%	19,26%	18,87%	18,64%	18,41%	18,21%
4,0%	18,85%	18,43%	18,17%	17,94%	17,79%
8,8%	17,73%	17,21%	16,89%	16,53%	16,25%

Nota: La humedad del suelo natural es del 20,0%, el tiempo cero (0) es el momento de la mezcla con cal.

Tabla 5-28. Pérdida de humedad en el tiempo. suelo + cal. (Elaboración propia)

Concentración cal (%)	Pérdida de humedad (%) / min
1,0%	-0,007%
2,0%	-0,004%
4,0%	-0,004%
8,8%	-0,006%

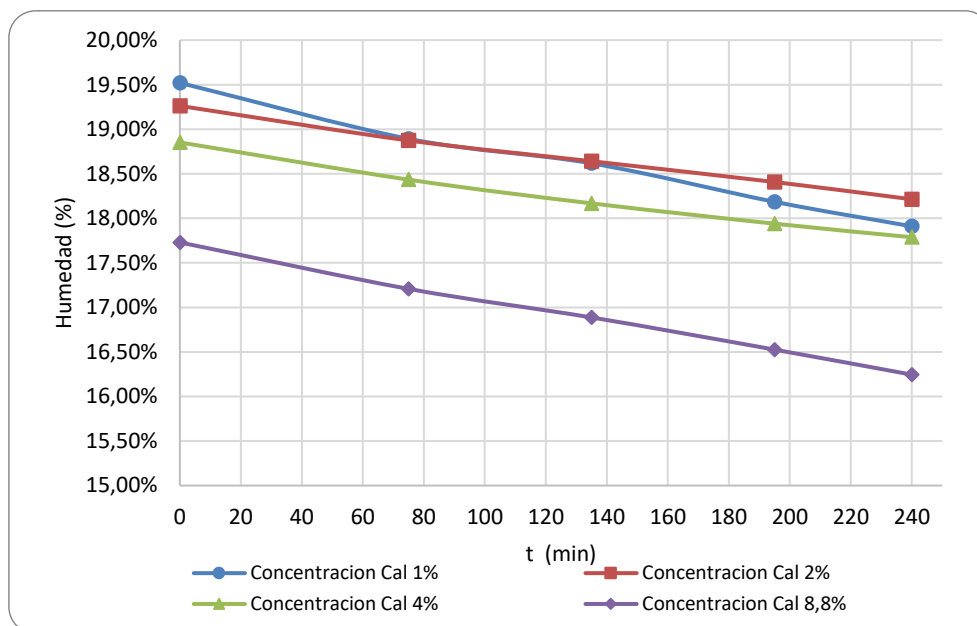


Figura 5-41. Humedad durante la reacción química. suelo + cal. (Elaboración propia)

▪ Estado hídrico mediante resultados de índice plástico

Se encontró para las mezclas de suelo con cal, que los límites de consistencia presentan variación en función de su acidez o alcalinidad, pues el suelo natural con un pH de 4.83 (Tabla 5-10.) y un IP de 12.8% sufre una disminución de su índice de plasticidad con el incremento de pH al ser mezclado con el estabilizante (Tabla 5-29 y Figura 5-42).

Tabla 5-29. Comportamiento IP (%) Vs. pH. Suelo + cal. (Elaboración propia)

Producto mejorador	Concentración producto (%)	Índice plástico Promedio (%)	Potencial de hidrogeno - pH
Suelo natural	0,0	12,8	4,83
Suelo + cal	3,0	4,0	12,38
	4,0	5,0	12,45
	5,0	6,0	12,50

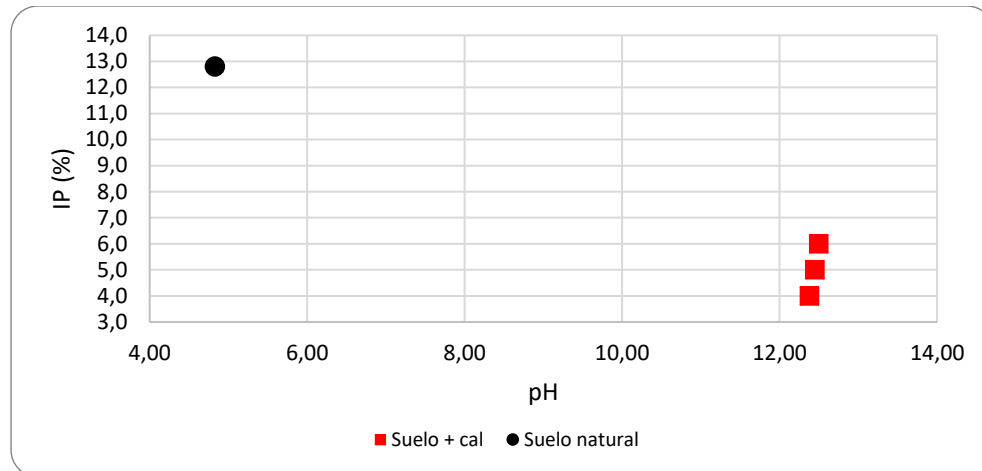


Figura 5-42. Comportamiento IP (%) Vs. pH. Suelo + cal (Elaboración propia)

La variación del índice de plasticidad del suelo, para rangos de concentración de cal entre 3.0% y 5.0%, tiende a un ligero incremento en proporción a la concentración del estabilizante, según se muestra en la Figura 5-43.

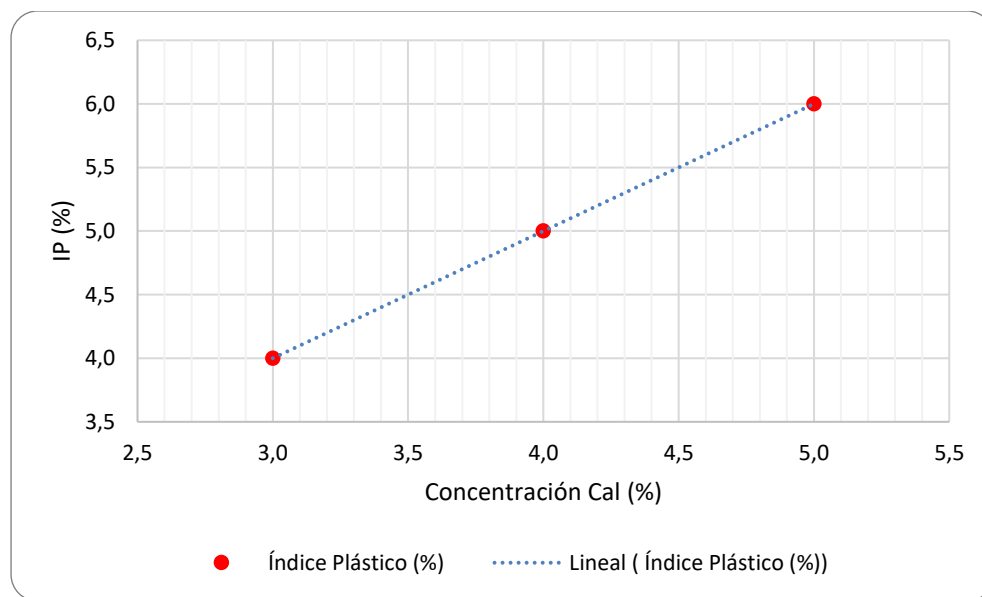


Figura 5-43. Comportamiento IP (%) según concentración de cal (Elaboración propia)

- Eficacia hidráulica (absorción y succión)

Para los suelos mezclados con cal en sus diferentes concentraciones, bajo las condiciones de humedad óptima y densidad máxima seca establecidas, la capacidad

de retención de agua (absorción y succión) mediante pruebas de eficacia hidráulica se resumen en la Tabla 5-30.

Tabla 5-30. Capacidad de retención de agua. Suelo + cal. (Elaboración propia)

Material	Tiempo (días)	Absorción acumulada (%)	Succión (gr/cm ²)
Suelo Natural	7,0	5,19%	1,0469
Suelo + Cal 3,0%	7,0	1,72%	0,3368
Suelo + Cal 5,0%	7,0	1,00%	0,2000

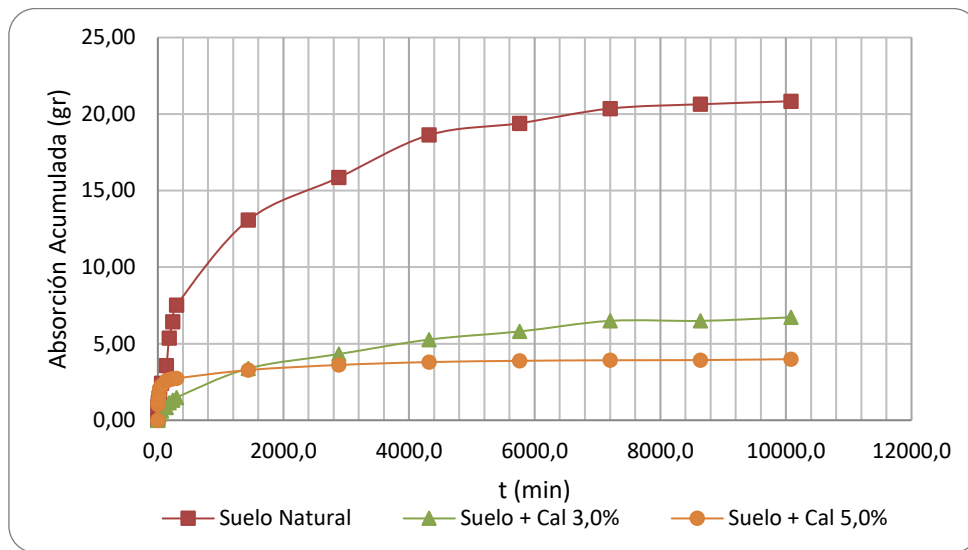


Figura 5-44. Capacidad de retención de agua (Absorción). Suelo + cal. (Elaboración propia)

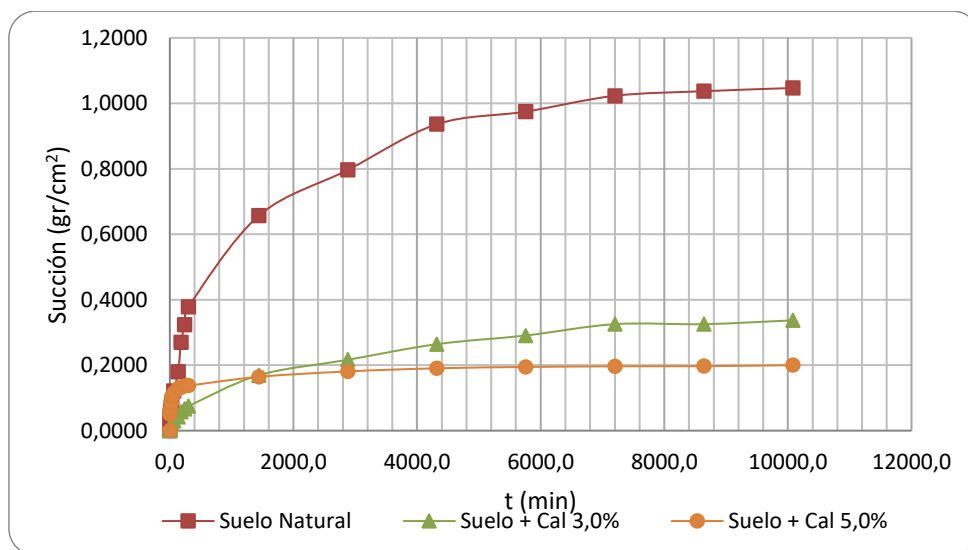


Figura 5-45. Capacidad de retención de agua (Succión). Suelo + cal. (Elaboración propia)

La capacidad de absorción de agua disminuye con la concentración de cal (Tabla 5-30 y Figura 5-44), la cual experimenta reducciones entre 66.9% - 80.7% aproximadamente al compararlos con los resultados encontrados con suelo natural.

▪ **Elaboración, descripción de muestras (probetas) y pruebas de compresión simple**

Siguiendo el procedimiento establecido para la fabricación de probetas, conservando las propiedades de compactación: densidad máxima seca de 1771.7kg/m³ y humedad optima de 15.5%, y para cada concentración de cal 3%, 4%, 5%, se fabricaron un total de 12 probetas (numeral 4.3 Objeto de análisis) pretendiendo con ello, realizar pruebas de ensayos a edades aproximadas de maduración de 3, 7, 14 y 30 días (Tabla 5-31).

Tabla 5-31. Elaboración de probetas. Suelo + cal. (Elaboración propia)

Producto mejorador	Concentración producto (%)	Probeta No.	Fecha elaboración
Cal (Sólido)	3,0	1	martes, 27 de octubre de 2015
		2	jueves, 22 de octubre de 2015
		3	jueves, 22 de octubre de 2015
		4	sábado, 07 de noviembre de 2015
	4,0	5	martes, 27 de octubre de 2015
		6	viernes, 23 de octubre de 2015
		7	jueves, 22 de octubre de 2015
		8	sábado, 07 de noviembre de 2015
	5,0	9	martes, 27 de octubre de 2015
		10	viernes, 23 de octubre de 2015
		11	martes, 27 de octubre de 2015
		12	sábado, 07 de noviembre de 2015

Elaboración Propia

Se resume en la Tabla 5-32 y Tabla 5-33 , los datos característicos para cada una de las probetas fabricadas.

Tabla 5-32. Datos característicos Probetas No. 1 a 6. Suelo + cal. (Elaboración propia)

Probeta No.	1	2	3	4	5	6
Producto Mejorador	Cal	Cal	Cal	Cal	Cal	Cal
Concentración Producto (%)	3,0	3,0	3,0	3,0	4,0	4,0
Fecha Elaboración	27-oct-15	22-oct-15	22-oct-15	7-nov-15	27-oct-15	23-oct-15
Compactación %	99,9%	99,8%	99,3%	99,5%	100,0%	99,1%
Humedad Elaboración Probeta (%)	16,3%	14,6%	14,9%	15,0%	16,1%	15,0%
Longitud Inicial Probeta (mm)	100,51	100,66	100,55	100,81	100,04	100,93
Diámetro Inicial Probeta (mm)	49,87	50,16	50,27	50,11	50,01	50,23
Área Inicial Probeta (mm ²)	1953,30	1976,34	1984,76	1971,88	1964,02	1981,34

Datos Proctor $\gamma_{d,max}$ (gr/cm³)

1,77

ω_{opt} (%):

15,5

Elaboración propia

Tabla 5-33. Datos característicos Probetas No. 7 a 12. Suelo + cal. (Elaboración propia)

Probeta No.	7	8	9	10	11	12
Producto Mejorador	Cal	Cal	Cal	Cal	Cal	Cal
Concentración Producto (%)	4,0	4,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Fecha Elaboración	22-oct-15	7-nov-15	27-oct-15	23-oct-15	27-oct-15	7-nov-15
Compactación %	99,6%	98,9%	100,0%	99,9%	100,0%	99,7%
Humedad Elaboración Probeta (%)	14,9%	15,2%	15,8%	14,2%	14,5%	14,7%
Longitud Inicial Probeta (mm)	100,74	101,39	100,55	100,99	100,73	100,89
Diámetro Inicial Probeta (mm)	50,14	50,10	49,91	50,17	50,14	50,15
Área Inicial Probeta (mm²)	1974,24	1971,62	1956,43	1976,87	1974,77	1975,03
Datos Proctor $\gamma_{d,max}$ (gr/cm³)	1,77	ω_{opt} (%):		15,5		
Elaboración propia						

Para la experiencia de suelos mezclados con cal, se encontraron resultados de resistencia a la compresión que oscilan entre 5.85 – 12.03 kg/cm², 6.86 – 14.31 kg/cm² y 6.26 – 19.11 kg/cm² (Tabla 5-34, Tabla 5-35 y Tabla 5-36), describiendo incrementos en resistencia con el aumento de concentración del material estabilizante (Figura 5-47, Figura 5-50 y Figura 5-53).

Tabla 5-34. Resultados compresión simple. Suelo + 3.0% Cal. (Elaboración propia)

Probeta No.	1	2	3	4
Producto Mejorador	Cal	Cal	Cal	Cal
Concentración Producto (%)	3,0	3,0	3,0	3,0
Edad de Falla (días)	3	7	14	37
Compactación %	99,9%	99,8%	99,3%	99,5%
Carga Máxima (kg)	116,14	157,56	142,81	240,89
Esfuerzo Máximo (kg/cm²)	5,85	7,81	7,10	12,03
Esfuerzo Máximo (kPa)	585,00	781,00	710,00	1203,00
Deformación Axial a la Falla (%)	1,57	2,01	1,33	1,53
Deformación Axial Máxima (%)	2,64	3,05	1,99	1,70
Datos Proctor $\gamma_{d,max}$ (gr/cm³)	1,77	ω_{opt} (%):		15,5
Elaboración propia				

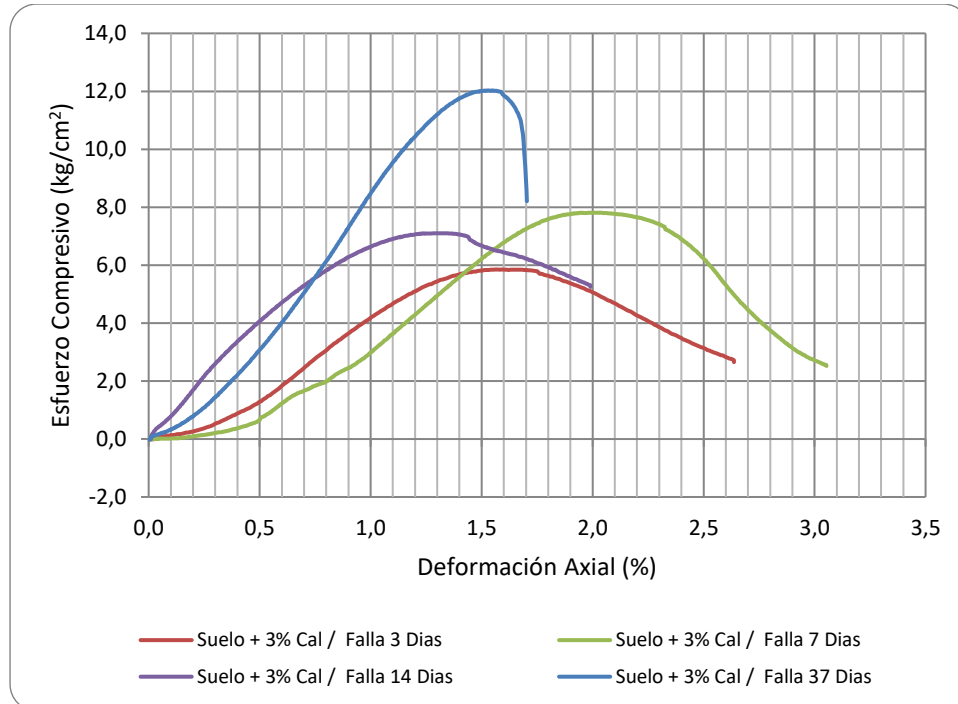


Figura 5-46. Curva Esfuerzo Vs. Deformación. Suelo + 3.0% Cal. (Elaboración propia)

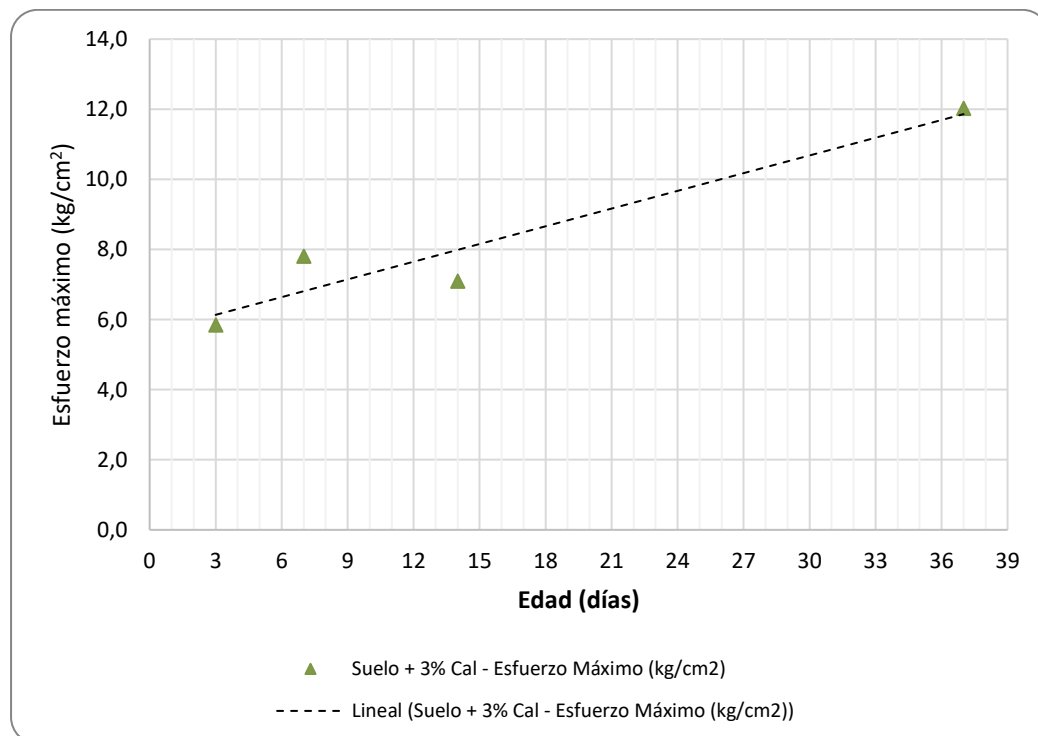


Figura 5-47. Esfuerzo máximo. Suelo + 3.0% Cal. (Elaboración propia)

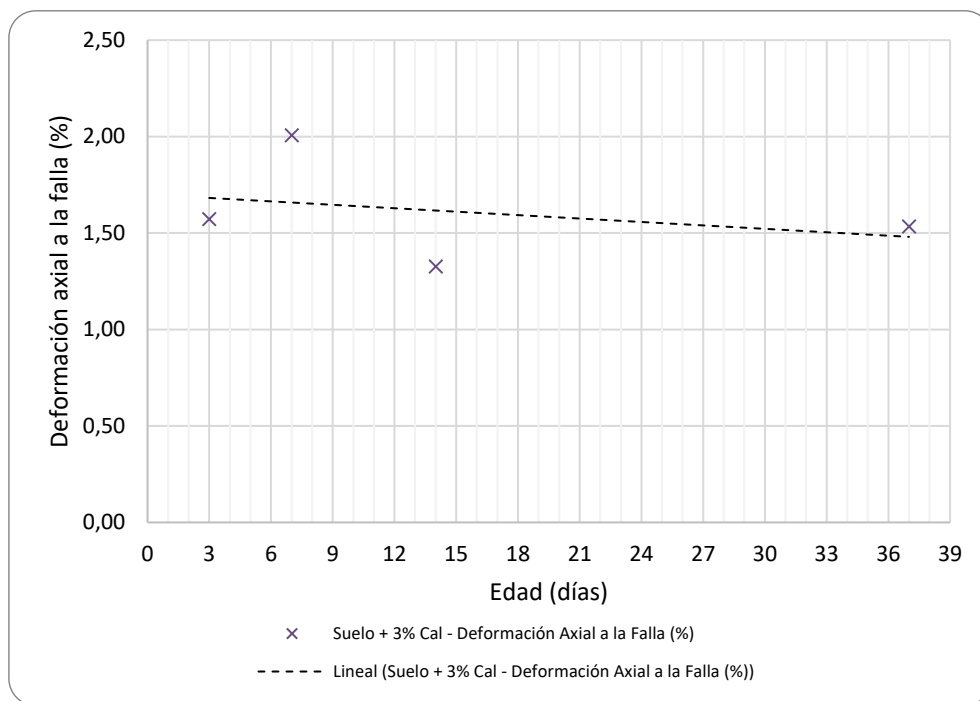


Figura 5-48. Deformación a la falla. Suelo + 3.0% Cal. (Elaboración propia)

Tabla 5-35. Resultados compresión simple. Suelo + 4.0% Cal. (Elaboración propia)

Probeta No.	5	6	7	8
Producto Mejorador	Cal	Cal	Cal	Cal
Concentración Producto (%)	4,0	4,0	4,0	4,0
Edad de Falla (días)	3	7	14	37
Compactación %	100,0%	99,1%	99,6%	98,9%
Carga Máxima (kg)	137,06	112,98	171,01	286,64
Esfuerzo Máximo (kg/cm ²)	6,86	5,62	8,54	14,31
Esfuerzo Máximo (kPa)	686,00	562,00	854,00	1431,00
Deformación Axial a la Falla (%)	1,71	1,49	1,43	1,60
Deformación Axial Máxima (%)	2,46	2,75	1,84	1,80

Datos Proctor $\gamma_{d,max}$ (gr/cm³)

1,77

 ω_{opt} (%): 15,5

Elaboración propia

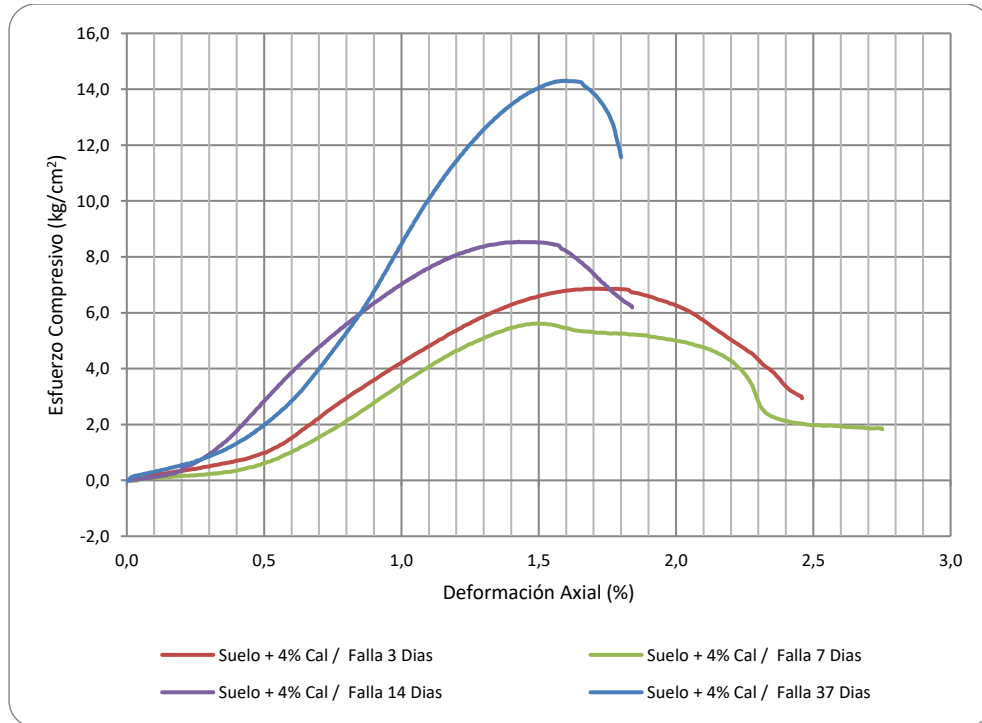


Figura 5-49. Curva Esfuerzo Vs. Deformación. Suelo + 4.0% Cal. (Elaboración propia)

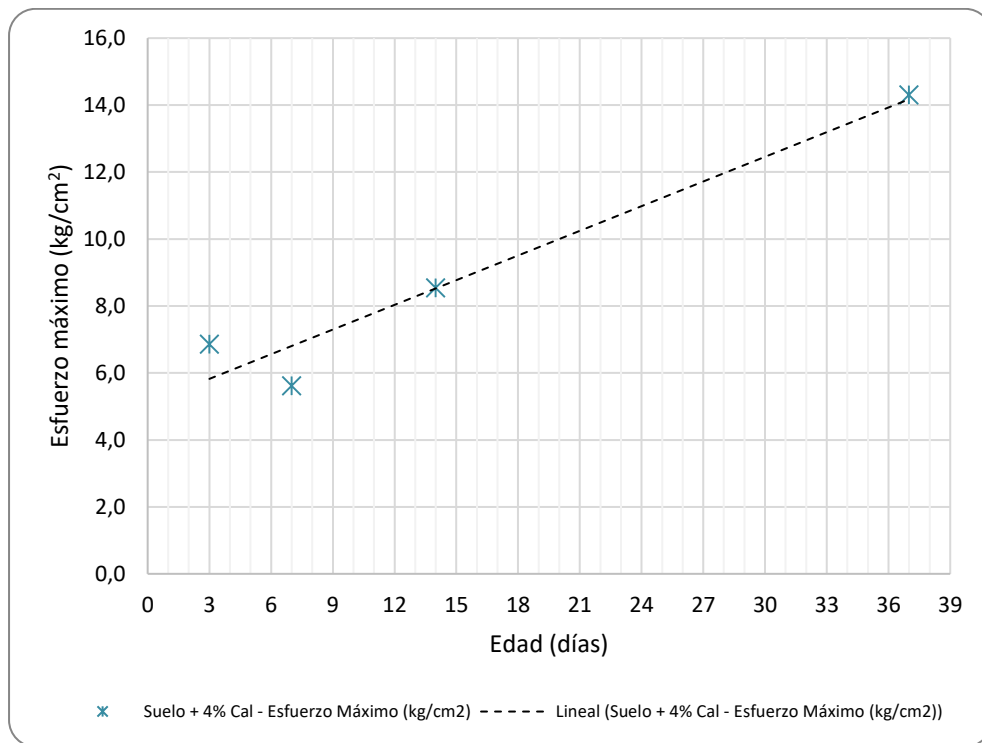


Figura 5-50. Esfuerzo máximo. Suelo + 4.0% Cal. (Elaboración propia)

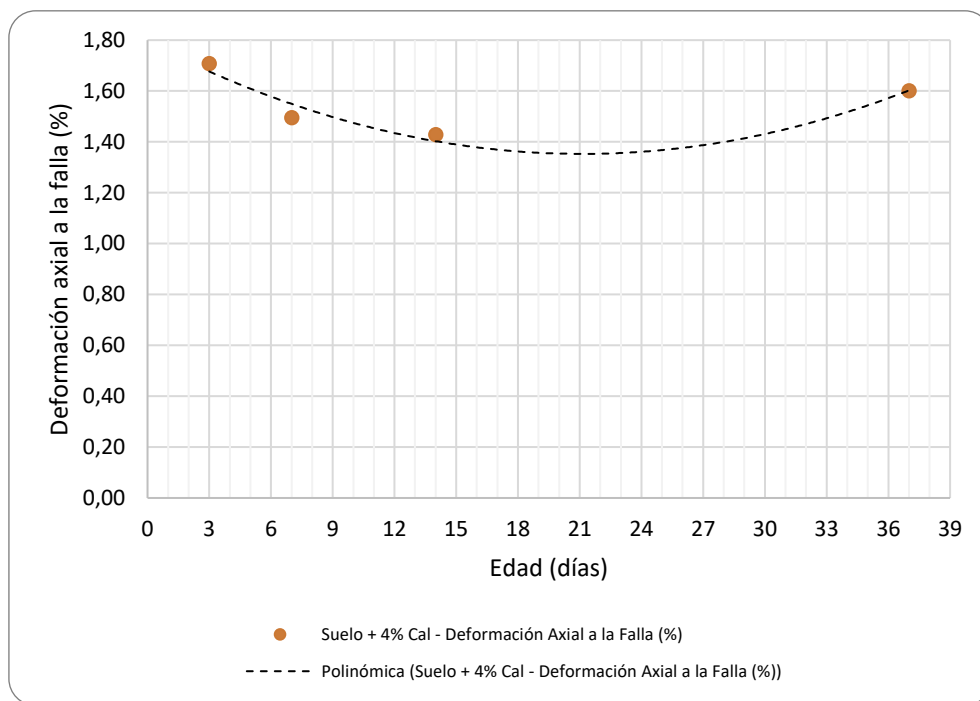


Figura 5-51. Deformación a la falla. Suelo + 4.0% Cal. (Elaboración propia)

Tabla 5-36. Resultados compresión simple. Suelo + 5.0% Cal. (Elaboración propia)

Probeta No.	9	10	11	12
Producto Mejorador	Cal	Cal	Cal	Cal
Concentración Producto (%)	5,0	5,0	5,0	5,0
Edad de Falla (días)	3	7	14	37
Compactación %	100,0%	99,9%	100,0%	99,7%
Carga Máxima (kg)	124,00	146,25	178,28	383,55
Esfuerzo Máximo (kg/cm ²)	6,26	7,29	8,88	19,11
Esfuerzo Máximo (kPa)	626,00	729,00	888,00	1911,00
Deformación Axial a la Falla (%)	1,27	1,40	1,68	1,57
Deformación Axial Máxima (%)	2,36	2,07	2,22	1,74

Datos Proctor $\gamma_{d,max}$ (gr/cm³)

1,77

 ω_{opt} (%): 15,5

Elaboración propia

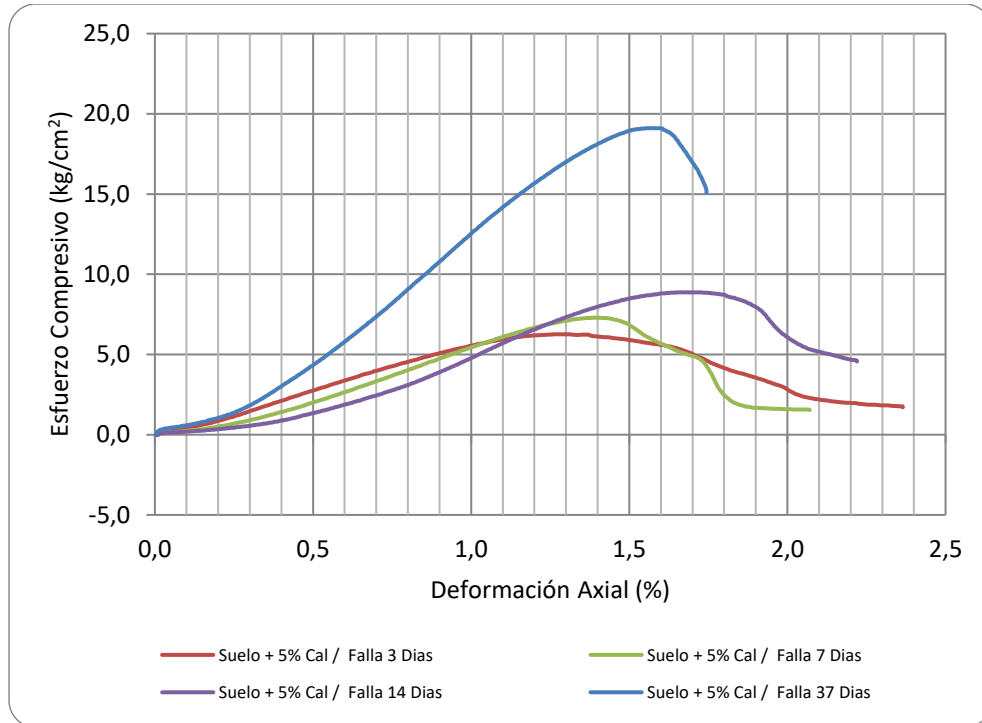


Figura 5-52. Curva Esfuerzo Vs. Deformación. Suelo + 5.0% Cal. (Elaboración propia)

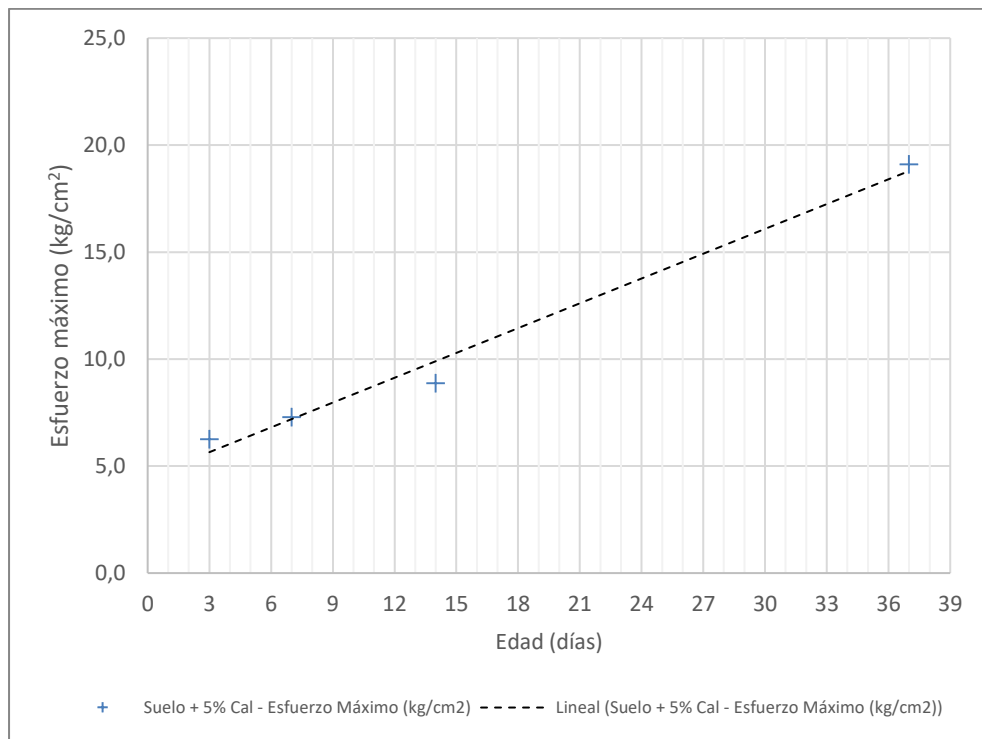


Figura 5-53. Esfuerzo máximo. Suelo + 5.0% Cal. (Elaboración propia)

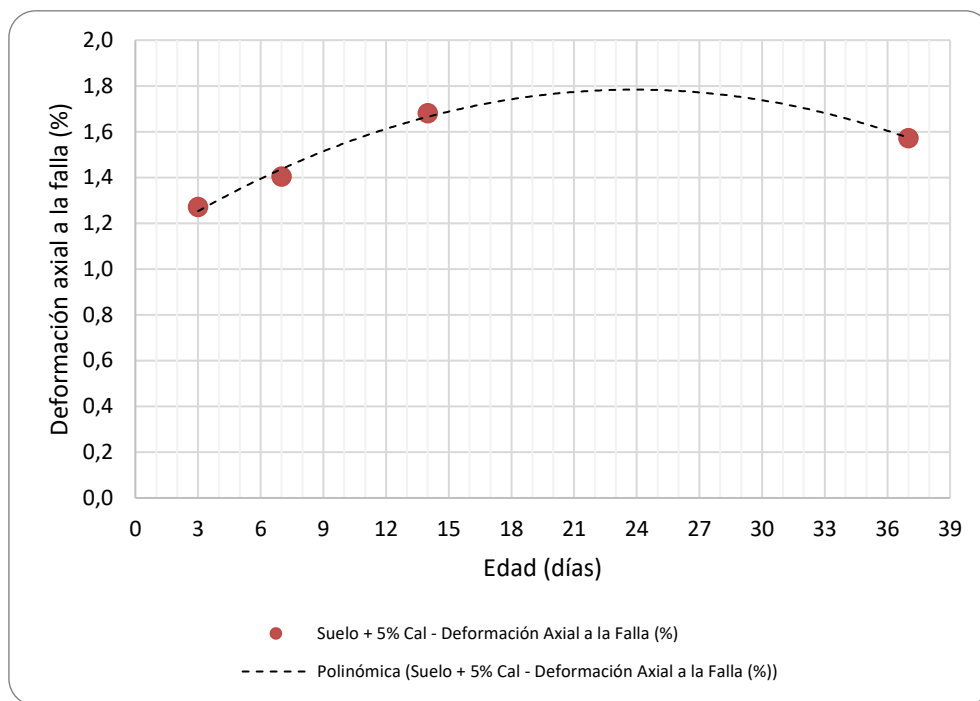


Figura 5-54. Deformación a la falla. Suelo + 5.0% Cal. (Elaboración propia)

También se pudo observar, según Tabla 5-37 y Figura 5-55, que los aportes en resistencia son significativos a edades de maduración superiores a 14 días, encontrando aportes de 3.5 kg/cm^2 por cada 1.0% de concentración del mejorador, y por tanto, mínimos aportes en resistencia para las diferentes concentraciones a edades de maduración menores a 14 días. Valores que son de utilidad para obtener resultados a edades tempranas durante un proceso constructivo en función de la concentración de cal aplicada.

Tabla 5-37. Resistencia según concentración de cal a diferentes edades. (Elaboración propia)

Esfuerzo máximo (kg/cm ²)			
Suelo + Cal	Concentración Producto (%)		
Edad	3,0	4,0	5,0
3 días	5,85	6,86	6,26
7 días	7,81	5,62	7,29
14 días	7,10	8,54	8,88
37 días	12,03	14,31	19,11

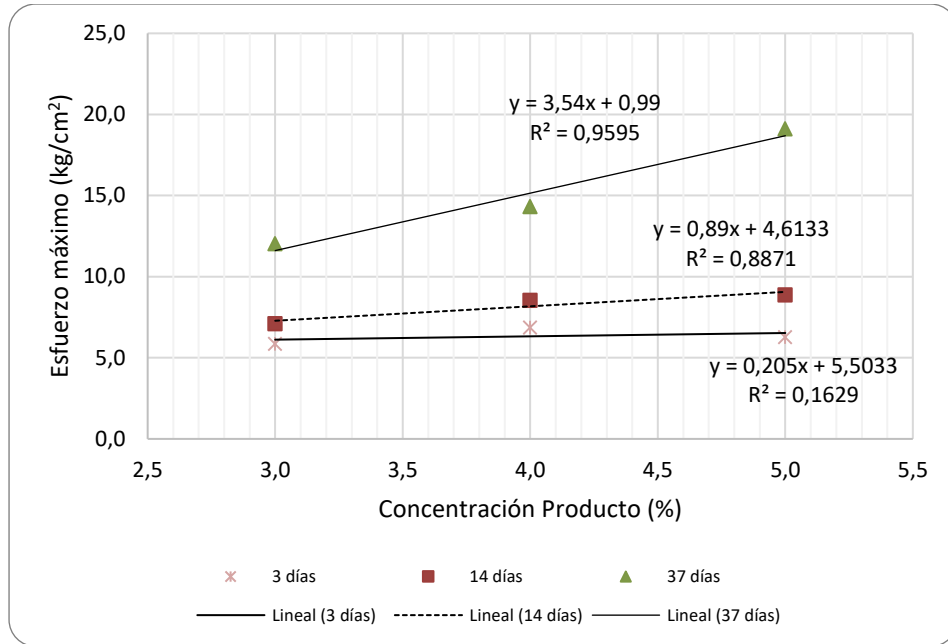


Figura 5-55. Resistencia según concentración de cal a diferentes edades. (Elaboración propia)

Consecuente a lo expresado en el párrafo anterior, en el que se enuncia que las resistencias significativas dentro del proceso de curado se evidencian a partir de 14 días, mediante Figura 5-56 comprobamos gráficamente lo enunciado.

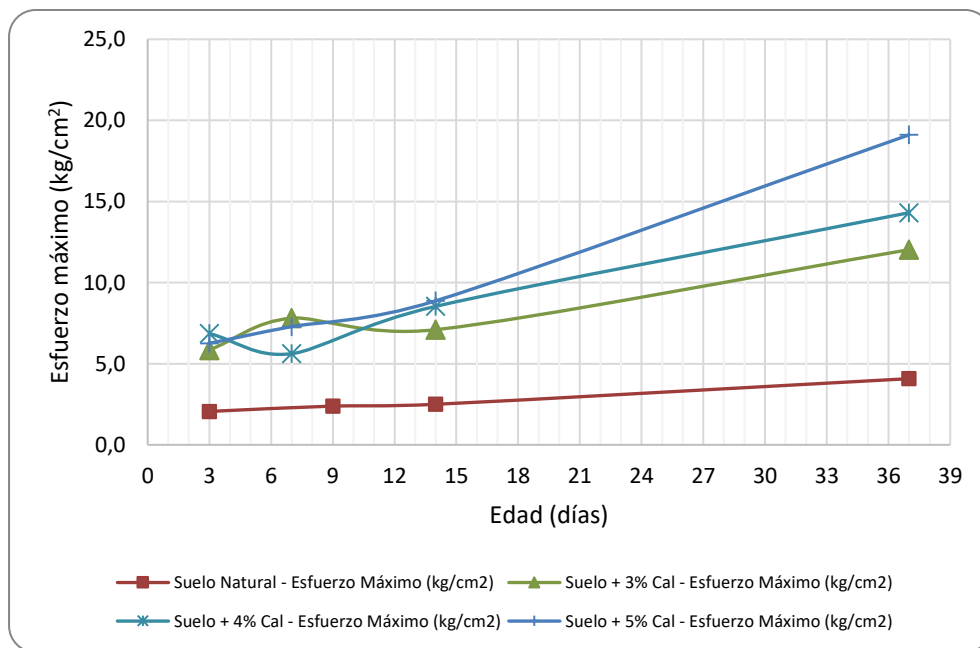


Figura 5-56. Comparativo esfuerzo máximo. Suelo + Cal. (Elaboración propia)

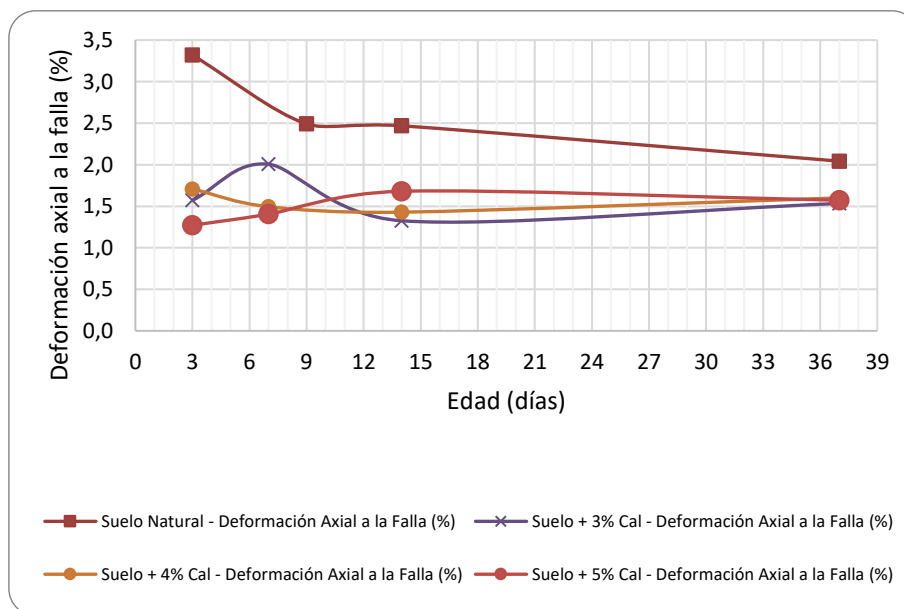


Figura 5-57. Comparativa deformación a la falla. Suelo + Cal. (Elaboración propia)

▪ Velocidad de onda (Vp)

Mediante el procedimiento establecido en el anexo A, similar a la práctica realizada con el suelo natural, se establece la velocidad de onda para las diferentes concentraciones de cal. Como resultados, mediante las pruebas de ultrasonido, se pudo obtener:

Tabla 5-38. Velocidad de onda. Suelo + cal. Edad 12 días. (Elaboración propia)

Probeta No.	Producto Mejorador	Concentración (%)	Edad (días)	Compactación (%)	Esfuerzo máximo (kg/cm ²)	Deformación axial a la falla (%)	Vp (m/s)
28	Suelo Natural	0,0	12	99,8%	2,50	2,47	722
4	Cal	3,0	12	99,5%	7,10	1,33	1039
8	Cal	4,0	12	98,9%	8,54	1,43	1058
12	Cal	5,0	12	99,7%	8,88	1,68	1102

La carga y esfuerzo máximo corresponden a los resultados de compresión simple
Elaboración propia

Tabla 5-39. Velocidad de onda. Suelo + cal. Edad 37 días. (Elaboración propia)

Probeta No.	Producto Mejorador	Concentración (%)	Edad (días)	Compactación (%)	Esfuerzo máximo (kg/cm ²)	Deformación axial a la falla (%)	Vp (m/s)
28	Suelo Natural	0,0	37	99,8%	4,08	2,04	1027
4	Cal	3,0	37	99,5%	12,03	1,53	1231
8	Cal	4,0	37	98,9%	14,31	1,60	1278
12	Cal	5,0	37	99,7%	19,11	1,57	1398

La carga y esfuerzo máximo corresponden a los resultados de compresión simple
Elaboración propia

Para los suelos estabilizados con cal para concentraciones de 3.0%, 4.0% y 5.0%, se puede observar en la Figura 5-58 similar comportamiento al de las probetas fabricadas con suelo natural, evidencian para cada concentración de cal y a edades de curado de 12 y 37 días, incrementos considerables en las velocidades de onda de 8,4%, 20,8% y 26,9% respectivamente, describiendo una proporcionalidad directa con la edad de curado.

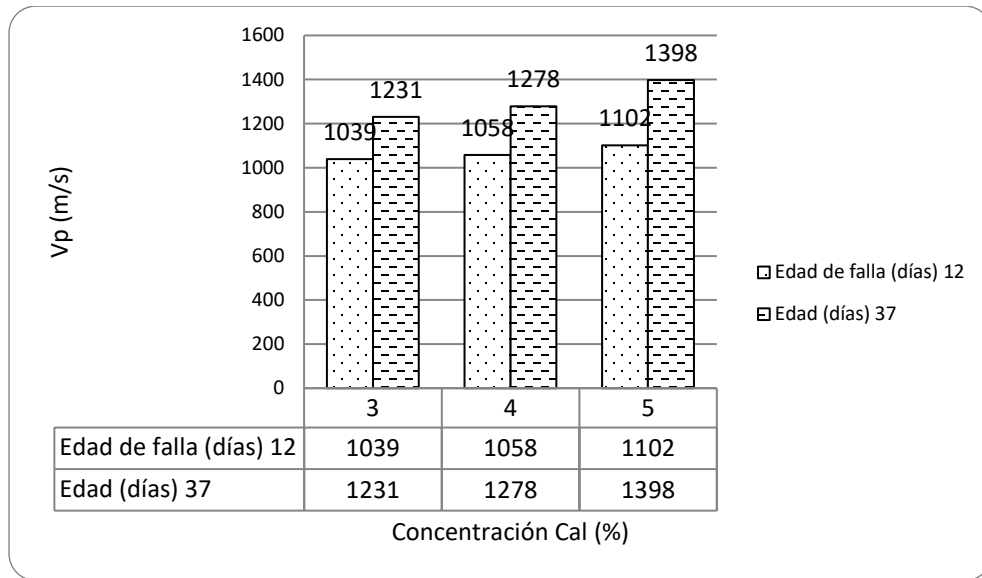


Figura 5-58. Comportamiento de la velocidad de onda según concentración de cal. (Elaboración propia)

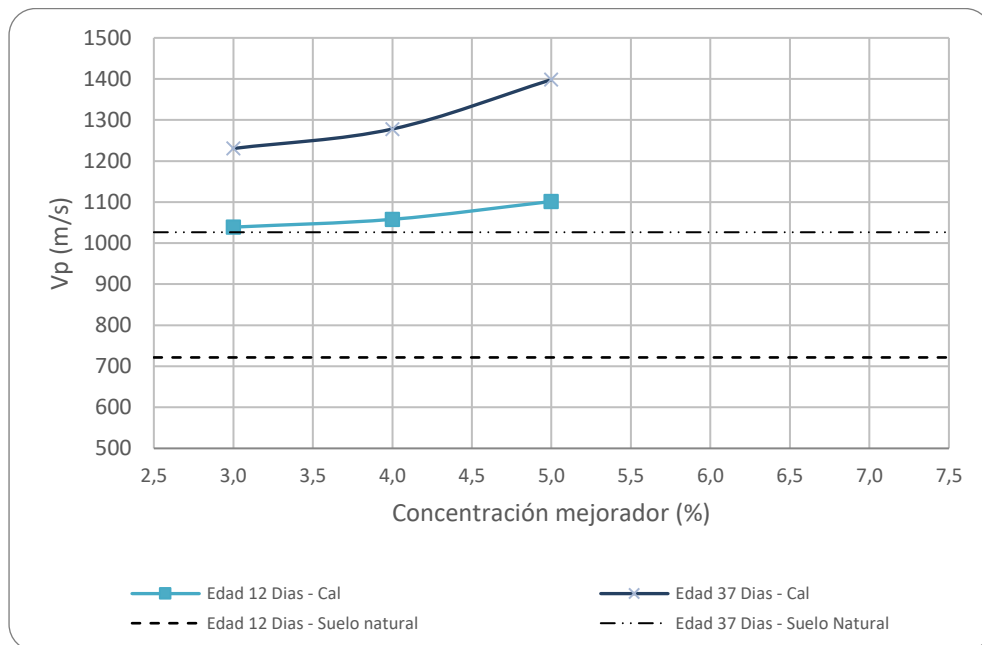


Figura 5-59. Comportamiento de la velocidad de onda según concentración de cal. (Elaboración propia)

Los aportes que trae consigo a la estructura del suelo el mejoramiento con cal, según lo describe la velocidad de onda y que se ve reflejado en las propiedades del material, se puede explicar de la siguiente manera: para los suelos estabilizados con cal con velocidades de onda entre 1039 – 1398m/s y con resistencias a la compresión simple entre 7.10-19.11kg/cm² (edades de curado entre 12 y 37 días) denotan incrementos considerables respecto de las propiedades mecánicas del material al tener como referencia las condiciones del suelo natural, el cual reporta velocidades de onda entre 722-1027m/s y resistencia a la compresión simple de 2.50-4.08kg/cm² (edades de curado entre 12 y 37 días) y que se puede evidencia en la Figura 5-59 y Figura 5-60.

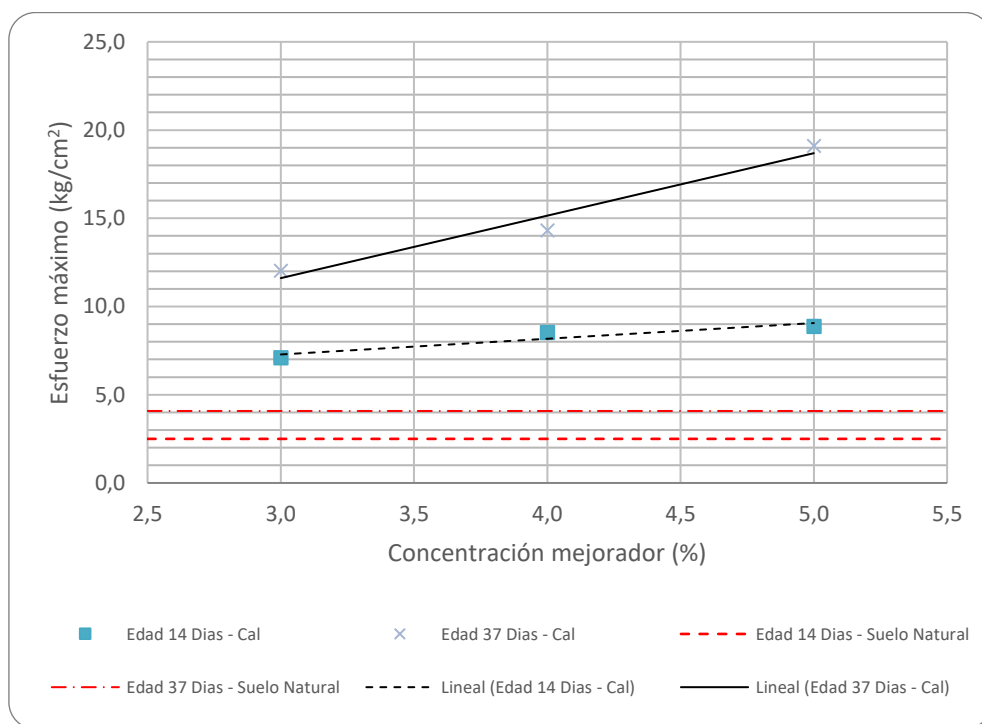


Figura 5-60. Esfuerzo máximo en compresión simple. Suelo + Cal. (Elaboración propia)

▪ Determinación de la dosificación de trabajo

Según la estimación de cal necesaria para estabilizar un suelo a partir de la medida del pH, tal como se consideró en la *Dosificaciones y/o concentraciones de mejoradores* y lo establecido en la *Figura 5-39. Variación del pH según concentración de cal.*, encontramos para un pH de 12.40 una concentración de cal de 3.29%; que luego de evaluar su comportamiento a la compresión simple para concentraciones de 3.0% 4.0% y 5.0%, con resultados similares para 4.0% y 5.0%, se determinó como dosificación de trabajo para mezclas de suelo + cal una concentración del 4.0%.

▪ Módulo de resiliencia

Con la finalidad de valuar el módulo resiliente en mezclas de suelo + cal al 4.0%, se elaboran 2 probetas con las características relacionan en la Tabla 5-40.

Tabla 5-40. Datos característicos probetas No. 30 y 33. Suelo + cal (Elaboración propia)

Probeta No.	30	33
Producto Mejorador	Cal	Cal
Concentración Producto (%)	4,0	4,0
Fecha Elaboración	08-jul-16	08-jul-16
Fecha de Falla	15-jul-16	22-jul-16
Edad de Falla (días)	7	14
Longitud Inicial Probeta (mm)	100,29	100,40
Diámetro Inicial Probeta (mm)	50,31	50,33
Área Inicial Probeta (mm ²)	1987,92	1989,50
Volumen Inicial Probeta (cm ³)	199,37	199,75
Humedad (%)	15,53%	16,61%
Peso unitario seco (gr/cm ³)	1,75	1,73
Compactación %	98,9%	97,7%
Datos Proctor $\gamma_{d,max}$ (gr/cm ³)	1,77	
ω_{opt} (%):	15,5%	

Como se puede evidenciar en Figura 5-61 y Figura 5-62, las condiciones de densidad y humedad fueron estimadas utilizando como referencia la densidad seca máxima y humedad óptima acorde a los resultados del proctor modificado expuesto en Tabla 5-14.

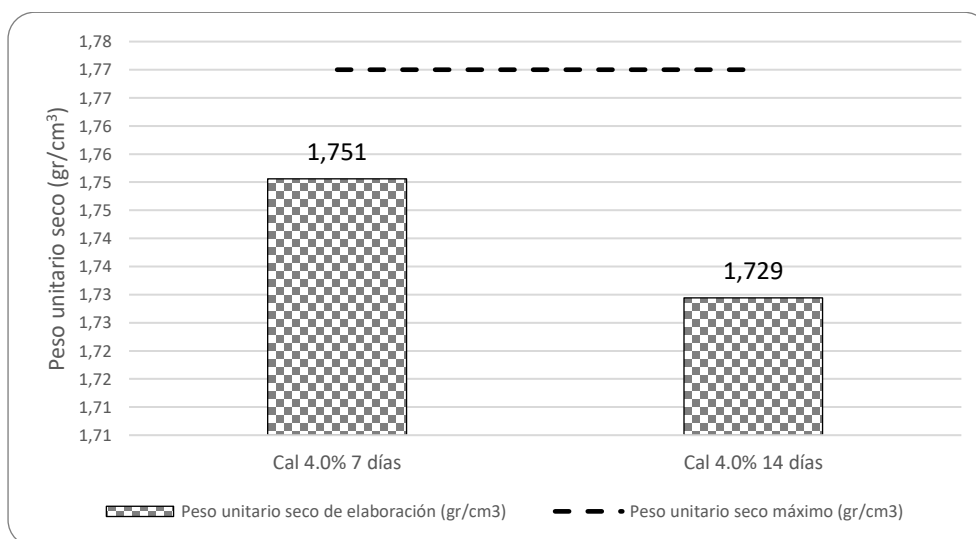


Figura 5-61. Control pesos unitarios para prueba de módulo dinámico. Suelo + cal (Elaboración propia)

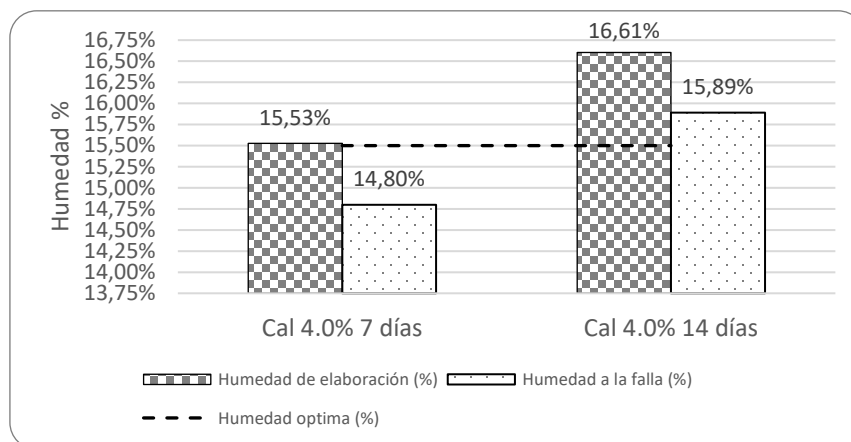


Figura 5-62. Control humedades para prueba de módulo dinámico. Suelo + cal (Elaboración propia)

Se describe en la Figura 5-63, Figura 5-64 y Figura 5-65, para el suelo + cal 4.0% con edades de curado de 7 y 14 días, un comportamiento de incremento del módulo resiliente – M_r frente al esfuerzo desviador – σ_a aplicado, los cuales a su vez se incrementan con la presión de cámara. Para los diferentes estados de presión de cámara y esfuerzo desviador durante el número de aplicaciones de carga de la prueba, se encuentran resultados de módulos resilientes para 7 días entre 28.44 – 91.91Mpa y a 14 días entre 30.08 – 77.55Mpa, sin aportes representativos con la edad de curado, dentro de dicho rango.

Tabla 5-41. Resultados Módulo Resiliente. Suelo + cal 4.0%. 7 días. (Elaboración propia)

Suelo + Cal 4,0% - Falla 7 días			
Cámara	σ_d Aplicado promedio	Deformación resiliente ϵ_r	Módulo Resiliente σ_d/ϵ_r
kPa	kPa	mm/mm	MPa
41,4	19,12	0,0002834	67,46
41,4	11,98	0,0002658	45,08
41,4	20,87	0,0003023	69,02
41,4	25,36	0,0003197	79,34
41,4	31,43	0,0003693	85,10
41,4	40,10	0,0004411	90,91
27,6	17,43	0,0004375	39,83
27,6	22,05	0,0003905	56,48
27,6	26,43	0,0004056	65,16
27,6	32,41	0,0004341	74,64
27,6	39,48	0,0004637	85,15
13,8	15,00	0,0005275	28,44
13,8	24,47	0,0005055	48,40
13,8	27,15	0,0004605	58,97
13,8	35,30	0,0005059	69,78
13,8	42,83	0,0005376	79,66
Máximo:		0,0005376	90,91
Mínimo:		0,0002658	28,44
			Prueba de corte triaxial
Esfuerzo axial máximo (kPa)			875,64
Deformación Axial a la Falla (%)			1,282%

Tabla 5-42. Resultados Módulo Resiliente. Suelo + cal 4.0%. 14 días. (Elaboración propia)

Suelo + Cal 4,0% - Falla 14 días			
Cámara	σ_d Aplicado promedio	Deformación resiliente ϵ_r	Módulo Resiliente σ_d/ϵ_r
kPa	kPa	mm/mm	MPa
41,4	18,27	0,0003022	60,44
41,4	13,26	0,0002890	45,87
41,4	19,01	0,0003303	57,56
41,4	25,39	0,0003594	70,66
41,4	31,94	0,0004233	75,45
41,4	37,76	0,0004869	77,55
27,6	18,38	0,0004470	41,11
27,6	20,66	0,0004084	50,59
27,6	26,79	0,0004295	62,38
27,6	32,10	0,0004608	69,66
27,6	39,60	0,0005143	76,99
13,8	13,95	0,0004639	30,08
13,8	22,37	0,0005193	43,07
13,8	27,41	0,0004902	55,92
13,8	36,08	0,0005478	65,86
13,8	46,65	0,0006221	74,99
Máximo:		0,0006221	77,55
Mínimo:		0,0002890	30,08
			Prueba de corte triaxial
Esfuerzo axial máximo (kPa)			917,34
Deformación Axial a la Falla (%)			1,279%

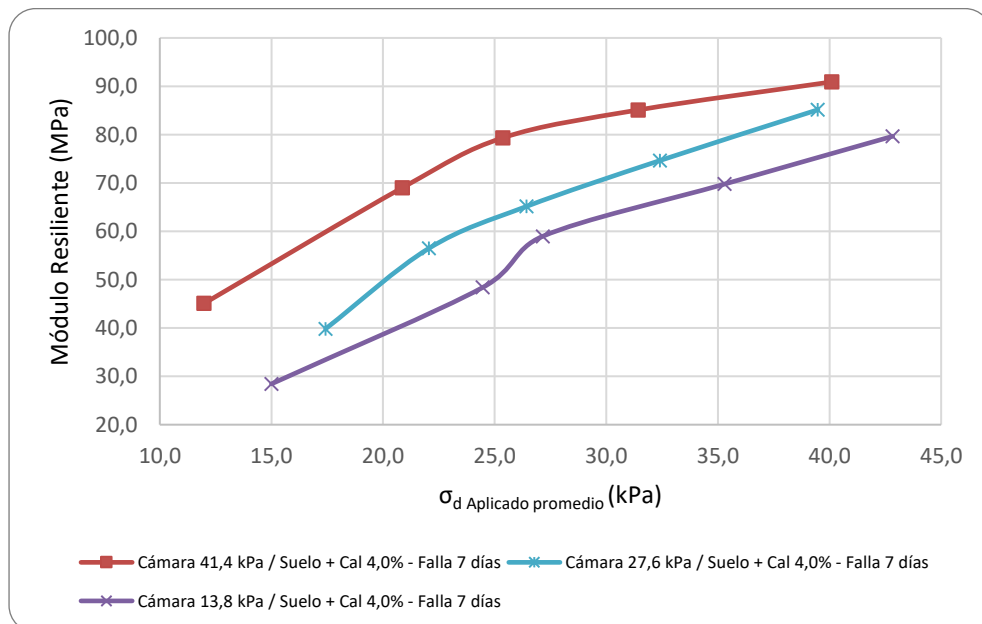


Figura 5-63. Relación entre el Módulo Resiliente y el Esfuerzo Desviador. Suelo + Cal 4.0%. 7 días. (Elaboración propia)

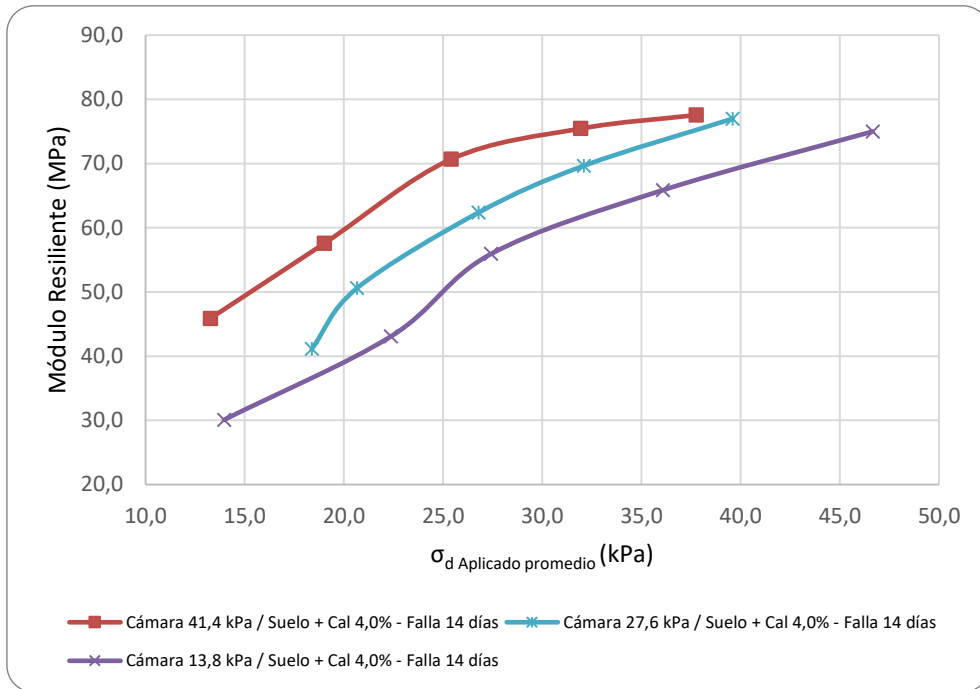


Figura 5-64. Relación entre el Módulo Resiliente y el Esfuerzo Desviador. Suelo + Cal 4.0%. 14 días. (Elaboración propia)

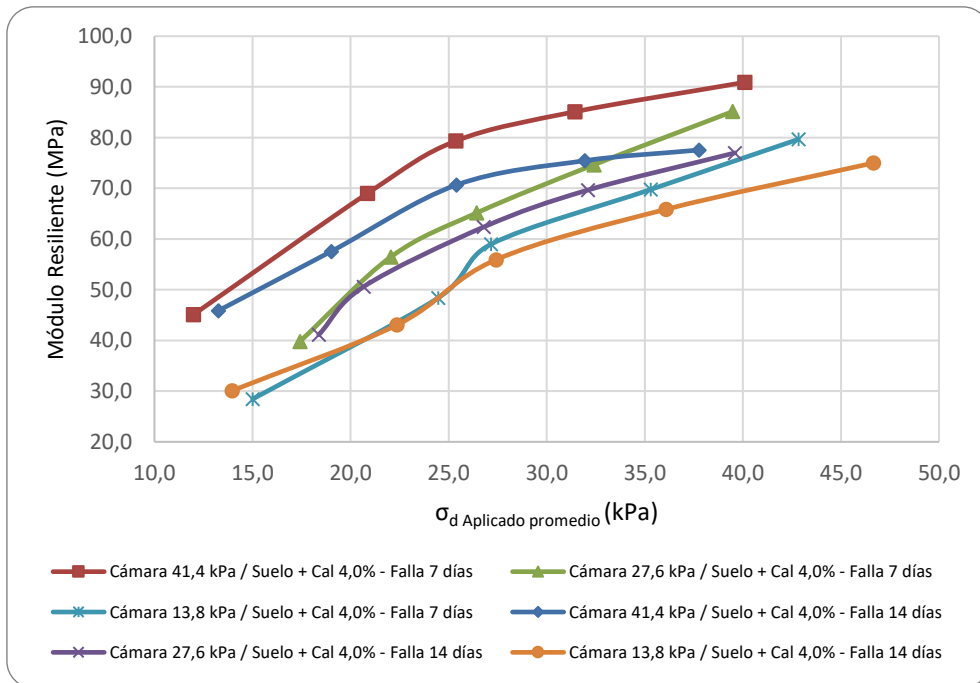


Figura 5-65. Relación entre el Módulo Resiliente y el Esfuerzo Desviador. Suelo + Cal 4.0%. (Elaboración propia)

Para 7 y 14 días, según Figura 5-65, con presiones de cámara de 13.8 y 27.6kPa la edad de curado no genera cambios considerables en el módulo resiliente respectivo para los diferentes esfuerzos desviadores.

5.3.2 Suelo mejorado con cemento

▪ Dosificaciones y/o concentraciones de mejoradores

Con referencia al Artículo INVIAS 350-13 “Suelo Cemento” (INVIAS, 2013), el cual establece para un suelo estabilizado con cemento, que el contenido mínimo del cementante en ningún caso será inferior a 3.0% de la masa seca del material por estabilizar, los porcentajes de concentración de cemento que se plantearon trabajar en la presente experiencia son 3%, 5% y 7%; el margen superior obedece a una situación donde el procedimiento constructivo deja de ser una propuesta viable económicamente.

Dichas situaciones de concentración permitirán la determinación de una dosificación de trabajo bajo condiciones de durabilidad y resistencia con la ayuda de la Tabla 350-5 Criterios de diseño para mezclas de suelo – cemento del artículo INVIAS mencionado.

▪ Variación del potencial de hidrógeno (pH)

Según las concentraciones de cemento utilizadas, el suelo experimenta cambios en su potencial de hidrogeno de una situación acida, con un pH de 4.83 en estado natural, a una alcalina o básica con pH que oscila entre 11.66 a 11.97 dependiendo de la concentración del cementante (Tabla 5-43 y Figura 5-66)

Tabla 5-43. Comportamiento pH (Suelo + cemento). (Elaboración propia)

Material	Valor pH
Suelo natural	4,83
Concentración cemento (%)	Valor pH
3,0%	11,66
5,0%	11,90
7,0%	11,97

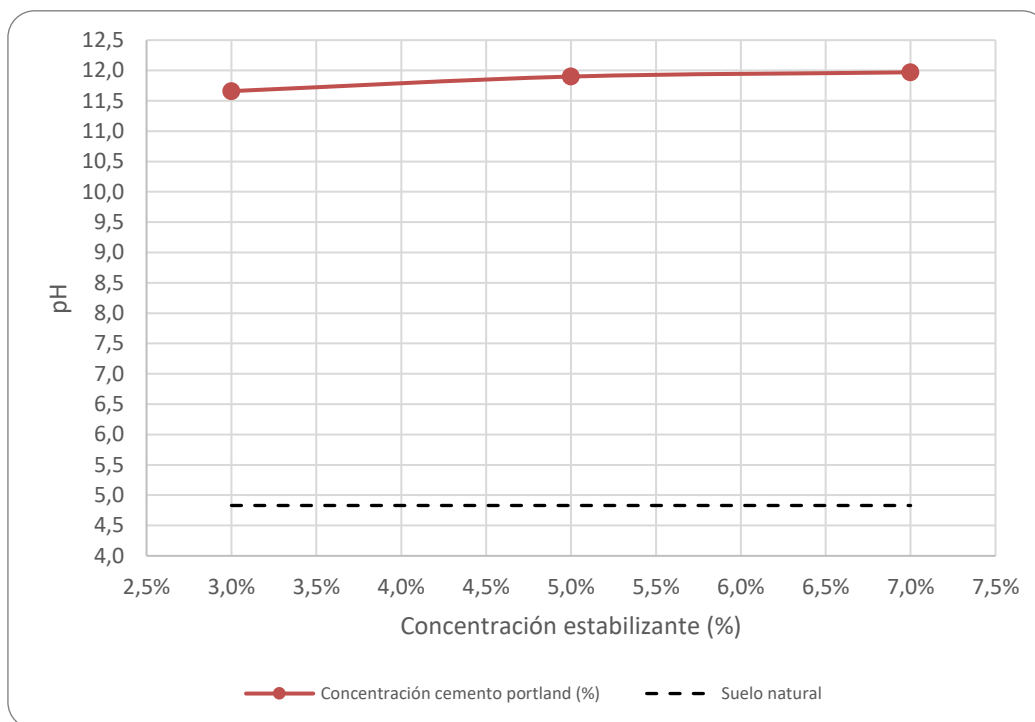


Figura 5-66. Comportamiento pH. Suelo + cemento. (Elaboración propia)

▪ Humedad durante la reacción química

Como seguimiento al proceso de mezclado (suelo, cemento y agua) y de reacción química, la Tabla 5-44 evidencia la pérdida de humedad con un rata promedio de 0,017% por cada minuto (1.02% / hr) (Tabla 5-45).

Tabla 5-44. Humedad durante la reacción química suelo + cemento. (Elaboración propia)

Tiempo Acumulado (min)	0	60	120	180	240	300	360	420	480
Concentración Cemento (%)	Comportamiento de la humedad durante la reacción química Suelo + Cemento (%)								
1,0%	19,10%	17,93%	17,10%	15,91%	15,05%	14,29%	13,28%	12,45%	11,90%
2,0%	19,21%	17,53%	16,39%	14,95%	13,81%	12,79%	11,70%	10,52%	9,90%
3,0%	17,74%	16,17%	15,09%	13,68%	12,64%	11,74%	10,75%	9,71%	9,11%
5,0%	17,23%	15,78%	14,68%	13,30%	12,31%	11,31%	10,34%	9,28%	8,69%
7,0%	16,77%	15,38%	14,43%	13,14%	12,17%	11,35%	10,44%	9,56%	9,01%
9,0%	16,64%	15,27%	14,34%	13,12%	12,18%	11,37%	10,44%	9,56%	9,02%

Nota: La humedad del suelo natural es del 20,0%, el tiempo cero (0) es el momento de la mezcla con cemento

Tabla 5-45. Perdida de humedad en el tiempo. Suelo + cemento. (Elaboración propia)

Concentración cemento (%)	Perdida de humedad (%) / min
1,0%	-0,015%
2,0%	-0,019%
3,0%	-0,018%
5,0%	-0,018%
7,0%	-0,016%
9,0%	-0,016%

Según Figura 5-67, la pérdida de humedad en el tiempo describe un comportamiento lineal. Siendo bajas las pérdidas, dichos valores pueden ser de utilidad en el proceso constructivo para lograr las humedades optimas en la compactación.

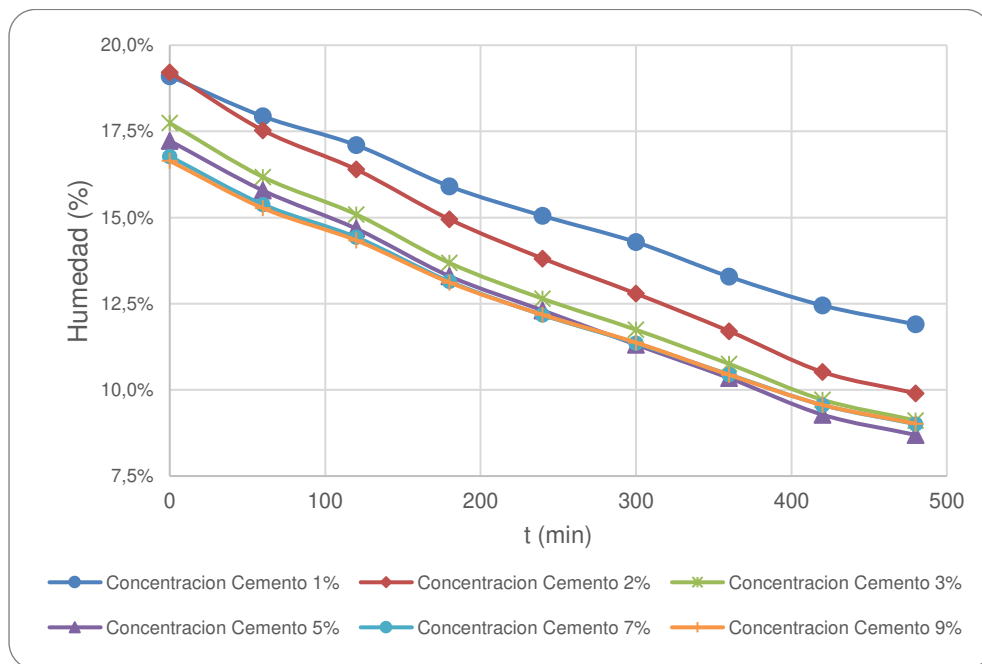


Figura 5-67. Humedad durante la reacción química. Suelo + cemento. (Elaboración propia)

▪ Estado hídrico mediante resultados de índice plástico

El comportamiento del índice de plasticidad IP (%) para mezclas suelo cemento, según Figura 5-69, presenta un comportamiento estable para variaciones en concentración del cemento entre 3.0% y 7.0%. a su vez, dicho IP (%) disminuye ostensiblemente cuando el suelo natural (IP 12.8%) es mezclado con el cementante (IP promedio del 7.0%), tal como se evidencia en Tabla 5-46 y Figura 5-68.

Tabla 5-46. Comportamiento IP (%) Vs. pH. Suelo + cemento. (Elaboración propia)

Producto mejorador	Concentración producto (%)	Índice plástico Promedio (%)	Potencial de hidrogeno – pH
Suelo natural	0,0	12,8	4,83
Suelo + cemento	3,0	7,0	11,66
	5,0	7,0	11,90
	7,0	7,0	11,97

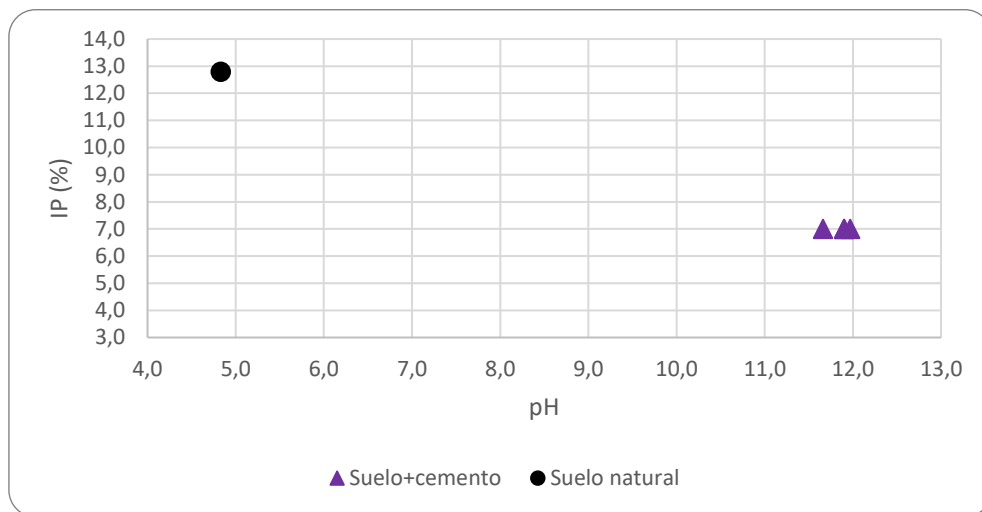


Figura 5-68. Comportamiento IP (%) Vs. pH. Suelo + cemento (Elaboración propia)

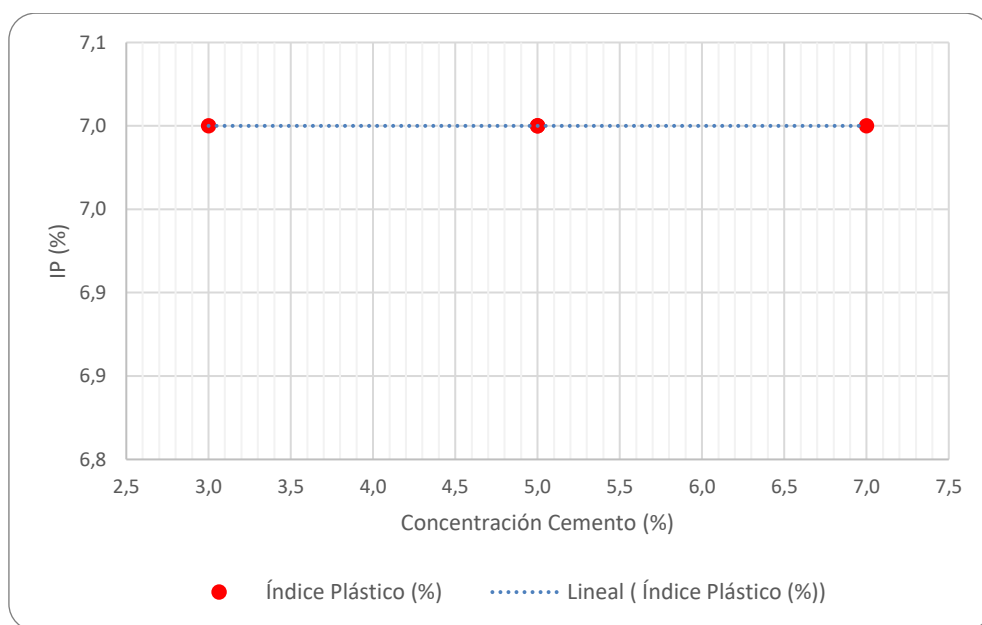


Figura 5-69. Comportamiento IP (%) según concentración de cemento. (Elaboración propia)

▪ Eficacia hidráulica (absorción y succión)

Para los suelos estabilizados con cemento y sus diferentes concentraciones, bajo las condiciones de humedad óptima y densidad máxima seca establecidas, la capacidad de retención de agua (absorción y succión) mediante pruebas de eficacia hidráulica se resumen en la Tabla 5-47.

Tabla 5-47. Capacidad de retención de agua. Suelo + cemento. (Elaboración propia)

Material	Tiempo (días)	Absorción acumulada (%)	Succión (gr/cm ²)
Suelo Natural	7,0	5,19%	1,0469
Suelo + Cemento 3,0%	7,0	1,58%	0,3148
Suelo + Cemento 5,0%	7,0	3,07%	0,6145
Suelo + Cemento 7,0%	6,0	5,34%	1,0692

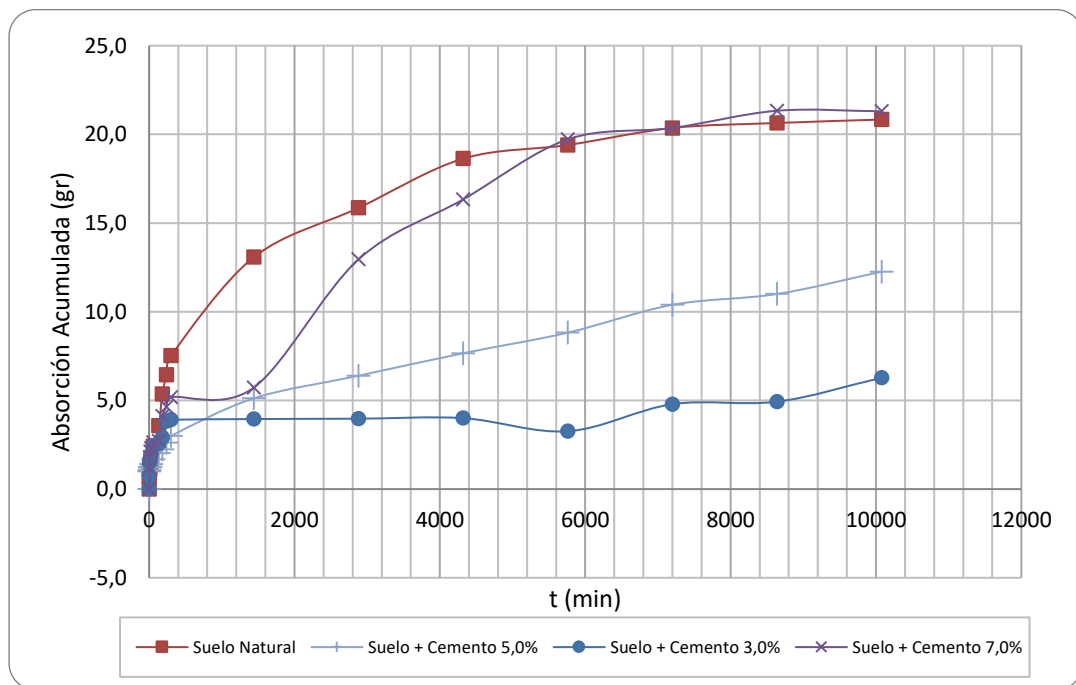


Figura 5-70. Capacidad de retención de agua (Absorción). Suelo + cemento. (Elaboración propia)

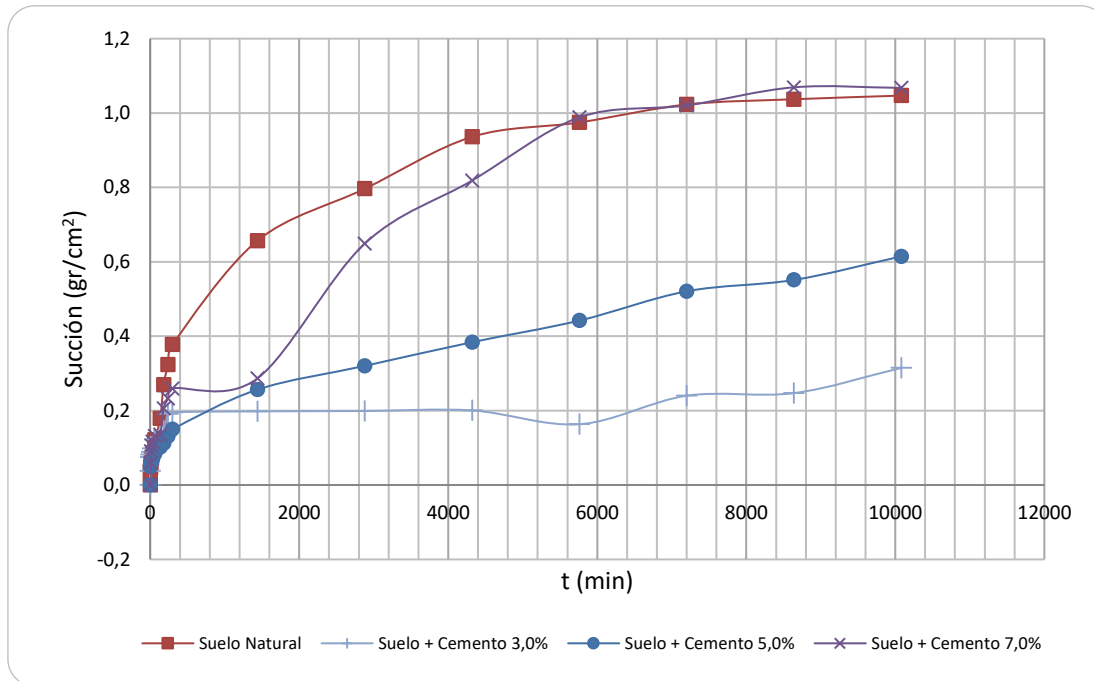


Figura 5-71. Capacidad de retención de agua (Succión). Suelo + cemento. (Elaboración propia)

Como se muestra en la Figura 5-70 y Figura 5-71, la retención de agua para los suelos mezclados con cemento en concentraciones menores a 5,0% evidencian una reducción en la succión entre el 40,8% - 69,5%, en concentraciones del 7,0% la succión de agua se incrementa hasta un 2,8%, se puede deducir entonces, que la química que aporta el cemento al suelo genera mayor capacidad de energía para la atracción y retención de las moléculas de agua, por ende, una mayor succión.

▪ Elaboración, descripción de muestras (probetas) y pruebas de compresión simple

Siguiendo el procedimiento establecido para la fabricación de probetas, conservando las propiedades de compactación: densidad máxima seca de $1771,7 \text{ kg/m}^3$ y humedad óptima de 15,5%, y para cada concentración de cemento 3%, 5%, 7%, se fabricaron un total de 12 probetas (numeral 4.3 Objeto de análisis) pretendiendo con ello, realizar pruebas de ensayos a edades aproximadas de maduración de 3, 7, 14 y 30 días (Tabla 5-48)

Tabla 5-48. Elaboración de probetas. Suelo + cal. (Elaboración propia)

Producto mejorador	Concentración producto (%)	Probeta No.	Fecha elaboración
Cemento (Sólido)	3,0	13	martes, 27 de octubre de 2015
		14	jueves, 29 de octubre de 2015
		15	miércoles, 04 de noviembre de 2015
		16	sábado, 07 de noviembre de 2015
	5,0	17	martes, 27 de octubre de 2015
		18	jueves, 29 de octubre de 2015
		19	miércoles, 04 de noviembre de 2015
		20	sábado, 07 de noviembre de 2015
	7,0	21	martes, 27 de octubre de 2015
		22	jueves, 29 de octubre de 2015
		23	miércoles, 04 de noviembre de 2015
		24	sábado, 07 de noviembre de 2015

Elaboración Propia

Se resume a continuación, en Tabla 5-49 y Tabla 5-50 , los datos característicos para cada una de las probetas fabricadas.

Tabla 5-49. Datos característicos Probetas No. 13 a 18. Suelo + Cemento. (Elaboración propia)

Probeta No.	13	14	15	16	17	18
Producto Mejorador	Cemento	Cemento	Cemento	Cemento	Cemento	Cemento
Concentración Producto (%)	3,0	3,0	3,0	3,0	5,0	5,0
Fecha Elaboración	27-oct-15	29-oct-15	04-nov-15	07-nov-15	27-oct-15	29-oct-15
Compactación %	100,0%	99,9%	99,8%	99,9%	99,9%	99,8%
Humedad Elaboración Probeta (%)	15,0%	14,7%	16,3%	14,7%	15,3%	15,2%
Longitud Inicial Probeta (mm)	100,78	100,95	99,80	101,61	101,06	100,25
Diámetro Inicial Probeta (mm)	50,03	50,00	50,07	49,94	49,93	50,15
Área Inicial Probeta (mm ²)	1965,85	1963,76	1968,73	1958,79	1958,26	1975,29

Datos Proctor $\gamma_{d,max}$ (gr/cm³)

1,77

 ω_{opt} (%): 15,5

Elaboración propia

Tabla 5-50. Datos característicos Probetas No. 19 a 24. Suelo + Cemento. (Elaboración propia)

Probeta No.	19	20	21	22	23	24
Producto Mejorador	Cemento	Cemento	Cemento	Cemento	Cemento	Cemento
Concentración Producto (%)	5,0	5,0	7,0	7,0	7,0	7,0
Fecha Elaboración	04-nov-15	07-nov-15	27-oct-15	29-oct-15	04-nov-15	07-nov-15
Compactación %	99,2%	100,4%	99,9%	100,0%	100,0%	100,3%
Humedad Elaboración Probeta (%)	14,5%	14,7%	14,6%	15,1%	16,2%	14,4%
Longitud Inicial Probeta (mm)	101,58	100,10	100,82	100,44	100,47	101,06
Diámetro Inicial Probeta (mm)	50,18	50,17	50,12	50,10	49,88	50,06
Área Inicial Probeta (mm ²)	1977,66	1976,61	1972,67	1971,62	1954,08	1967,95

Datos Proctor $\gamma_{d,max}$ (gr/cm³)

1,77

 ω_{opt} (%): 15,5

Elaboración propia

Según Tabla 5-51, Tabla 5-52 y Tabla 5-53, para la experiencia en suelos mezclados con cemento al 3.0%, 5.0% y 7.0%, se encontró para cada una de las concentraciones respectivamente, resultados de resistencia a la compresión simple con valores que oscilan entre 14.37 – 30.82 kg/cm², 22.60 – 56.88 kg/cm², 28.99 – 57.15 kg/cm², describiendo incrementos en resistencia con el aumento de concentración del material estabilizante (Figura 5-73, Figura 5-76 y Figura 5-79).

Tabla 5-51. Resultados compresión simple. Suelo + 3.0% Cemento. (Elaboración propia)

Probeta No.	13	14	15	16
Producto Mejorador	Cemento	Cemento	Cemento	Cemento
Concentración Producto (%)	3,0	3,0	3,0	3,0
Edad de Falla (días)	3	7	15	37
Compactación %	100,0%	99,9%	99,8%	99,9%
Carga Máxima (kg)	285,91	371,11	467,28	610,90
Esfuerzo Máximo (kg/cm ²)	14,37	18,59	23,38	30,82
Esfuerzo Máximo (kPa)	1437,00	1859,00	2338,00	3082,00
Deformación Axial a la Falla (%)	1,22	1,64	1,52	1,17
Deformación Axial Máxima (%)	2,19	2,04	2,46	1,39

Datos Proctor $\gamma_{d,max}$ (gr/cm³) 1,77 ω_{opt} (%): 15,5

Elaboración propia

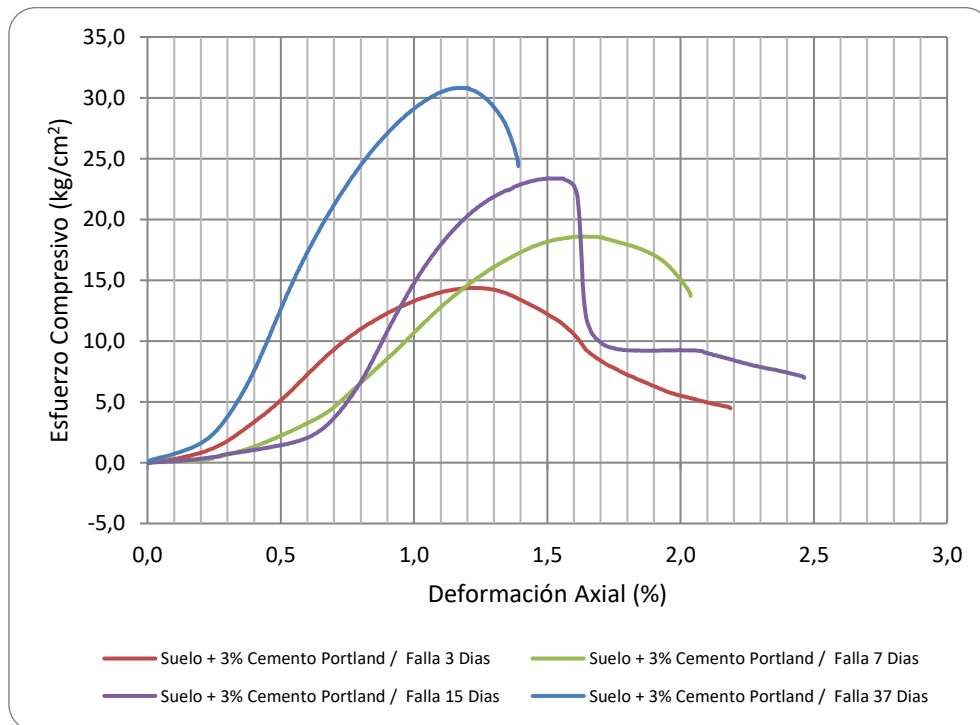


Figura 5-72. Curva Esfuerzo Vs. Deformación. Suelo + 3.0% Cemento. (Elaboración propia)

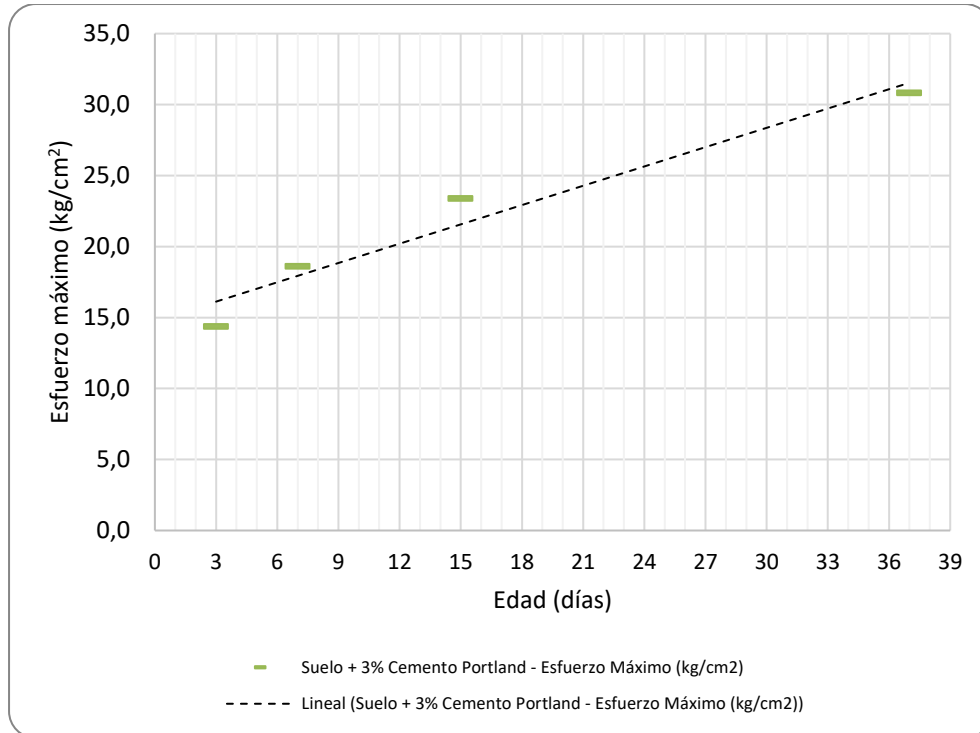


Figura 5-73. Esfuerzo máximo. Suelo + 3.0% Cemento. (Elaboración propia)

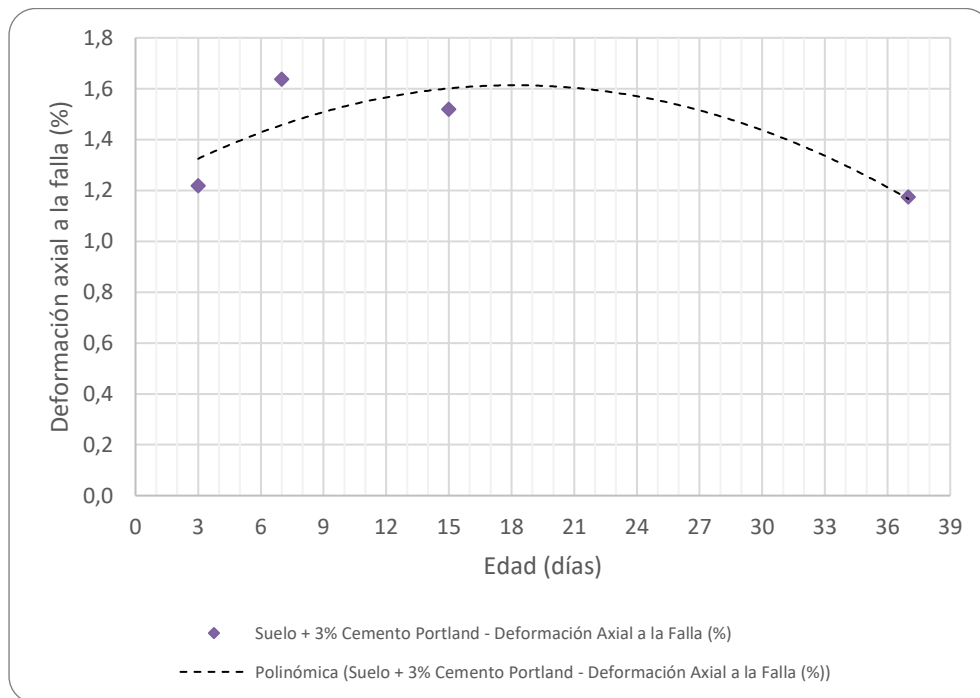


Figura 5-74. Deformación a la falla. Suelo + 3.0% Cemento. (Elaboración propia)

Tabla 5-52. Resultados compresión simple. Suelo + 5.0% Cemento. (Elaboración propia)

Probeta No.	17	18	19	20
Producto Mejorador	Cemento	Cemento	Cemento	Cemento
Concentración Producto (%)	5,0	5,0	5,0	5,0
Edad de Falla (días)	3	7	15	37
Compactación %	99,9%	99,8%	99,2%	100,4%
Carga Máxima (kg)	447,82	534,68	623,98	1138,54
Esfuerzo Máximo (kg/cm ²)	22,60	26,79	31,05	56,88
Esfuerzo Máximo (kPa)	2260,00	2679,00	3105,00	5688,00
Deformación Axial a la Falla (%)	1,17	1,02	1,59	1,25
Deformación Axial Máxima (%)	1,31	1,19	2,08	1,44

Datos Proctor $\gamma_{d,max}$ (gr/cm³)

1,77

 ω_{opt} (%): 15,5

Elaboración propia

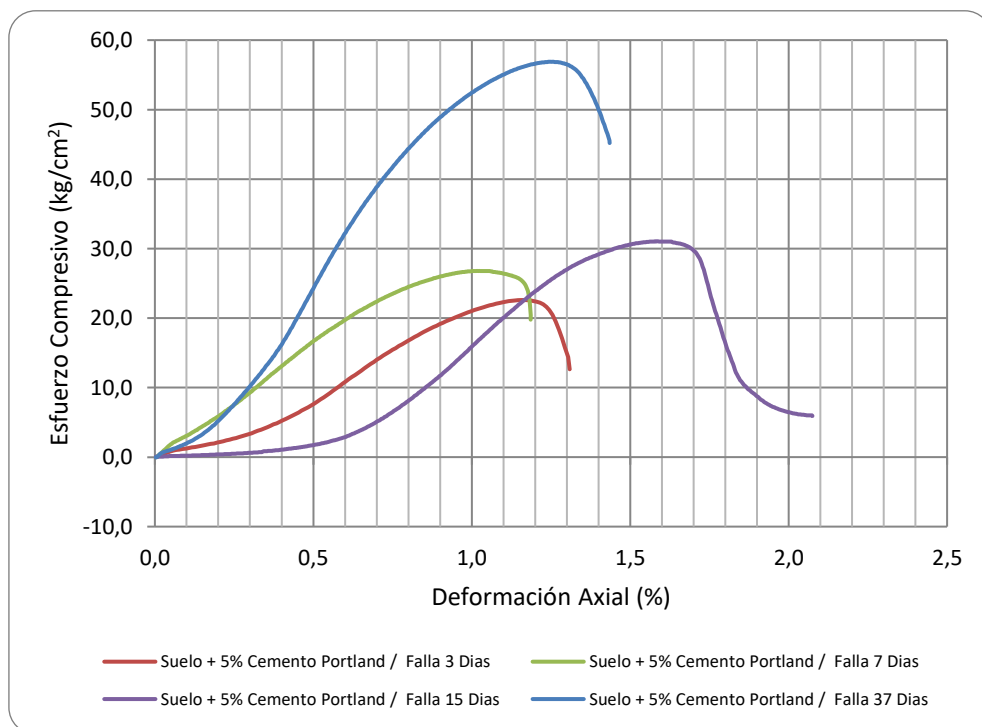


Figura 5-75. Curva Esfuerzo Vs. Deformación. Suelo + 5.0% Cemento. (Elaboración propia)

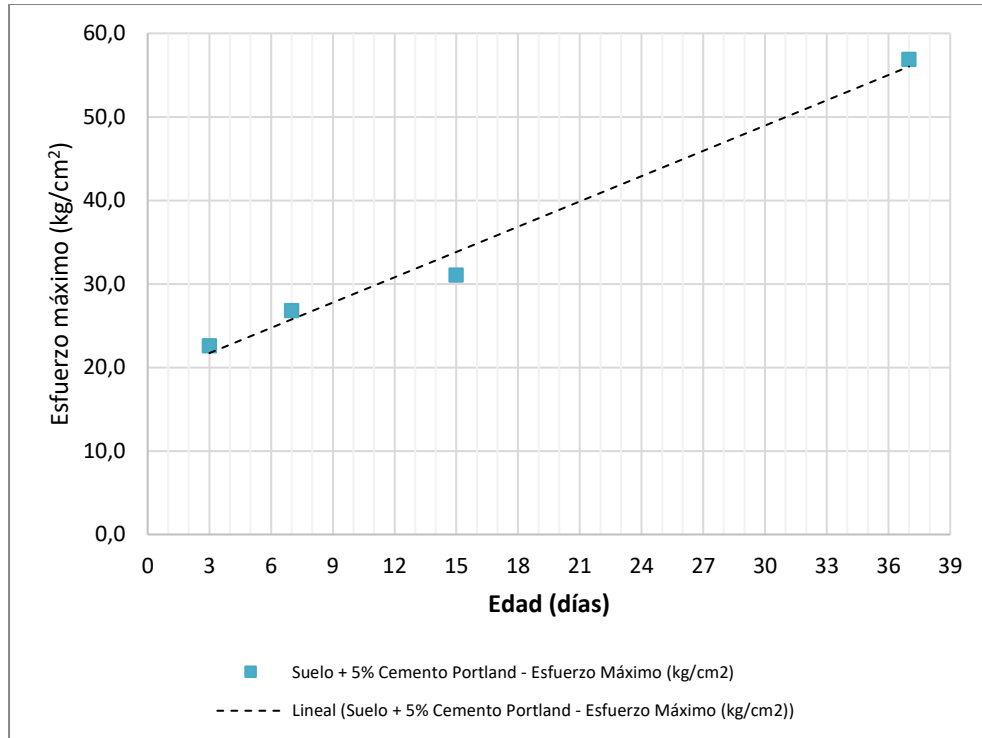


Figura 5-76. Esfuerzo máximo. Suelo + 5.0% Cemento. (Elaboración propia)

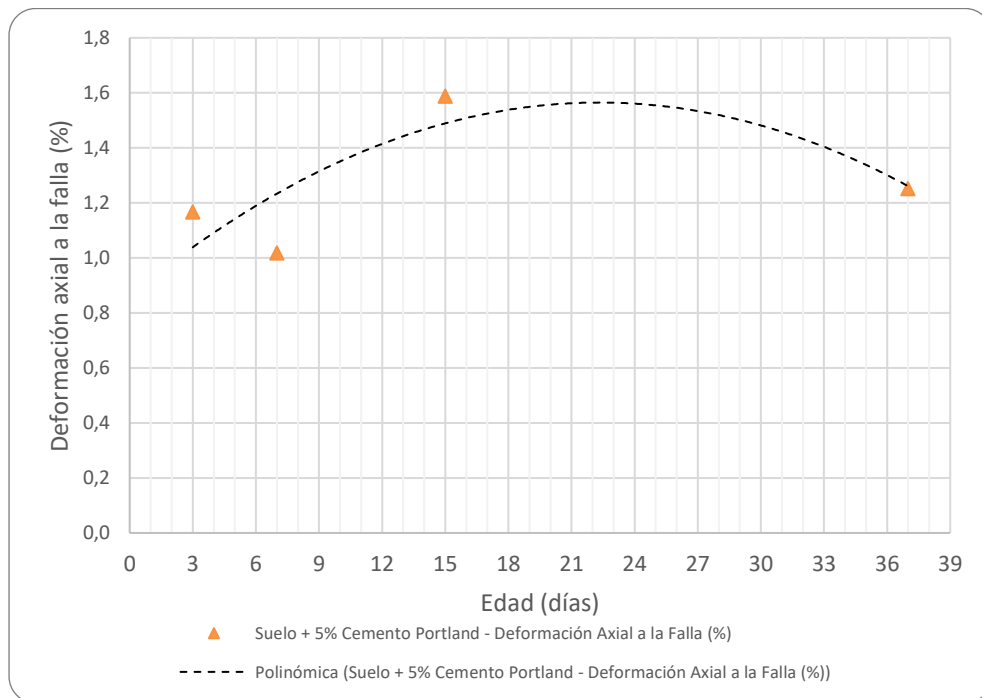


Figura 5-77. Deformación a la falla. Suelo + 5.0% Cemento. (Elaboración propia)

Tabla 5-53. Resultados compresión simple. Suelo + 7.0% Cemento. (Elaboración propia)

Probeta No.	21	22	23	24
Producto Mejorador	Cemento	Cemento	Cemento	Cemento
Concentración Producto (%)	7,0	7,0	7,0	7,0
Edad de Falla (días)	3	7	15	37
Compactación %	99,9%	100,0%	100,0%	100,3%
Carga Máxima (kg)	578,46	784,55	978,58	1137,95
Esfuerzo Máximo (kg/cm ²)	28,99	39,28	49,45	57,15
Esfuerzo Máximo (kPa)	2899,00	3928,00	4945,00	5715,00
Deformación Axial a la Falla (%)	1,15	1,29	1,26	1,16
Deformación Axial Máxima (%)	2,18	1,61	1,38	1,36

Datos Proctor $\gamma_{d,max}$ (gr/cm³) 1,77 ω_{opt} (%): 15,5

Elaboración propia

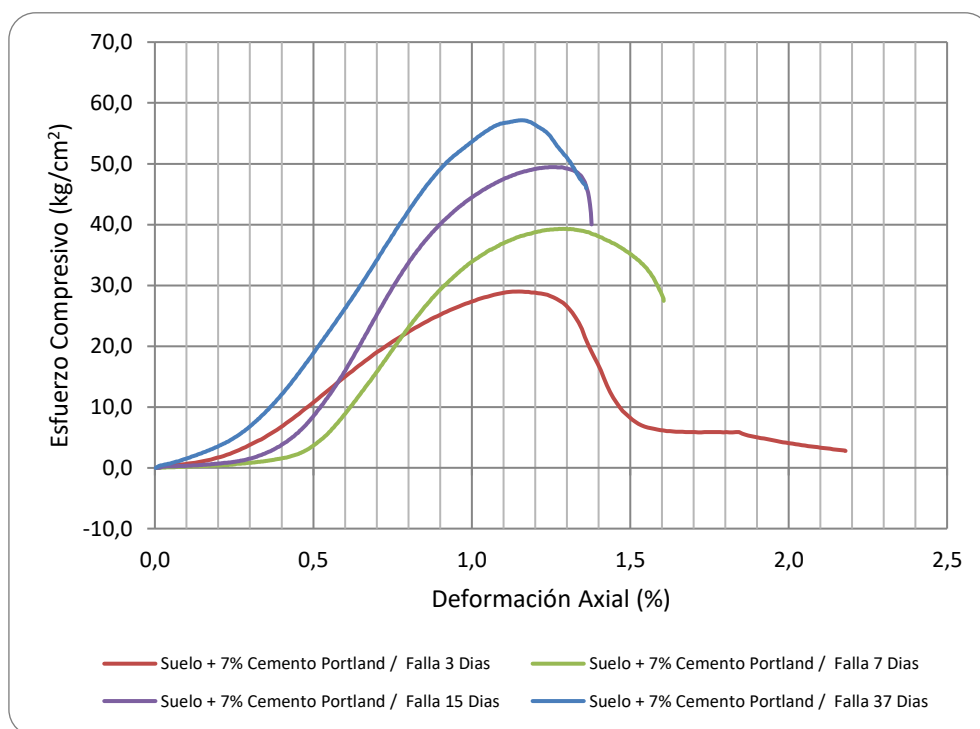


Figura 5-78. Curva Esfuerzo Vs. Deformación. Suelo + 7.0% Cemento. (Elaboración propia)

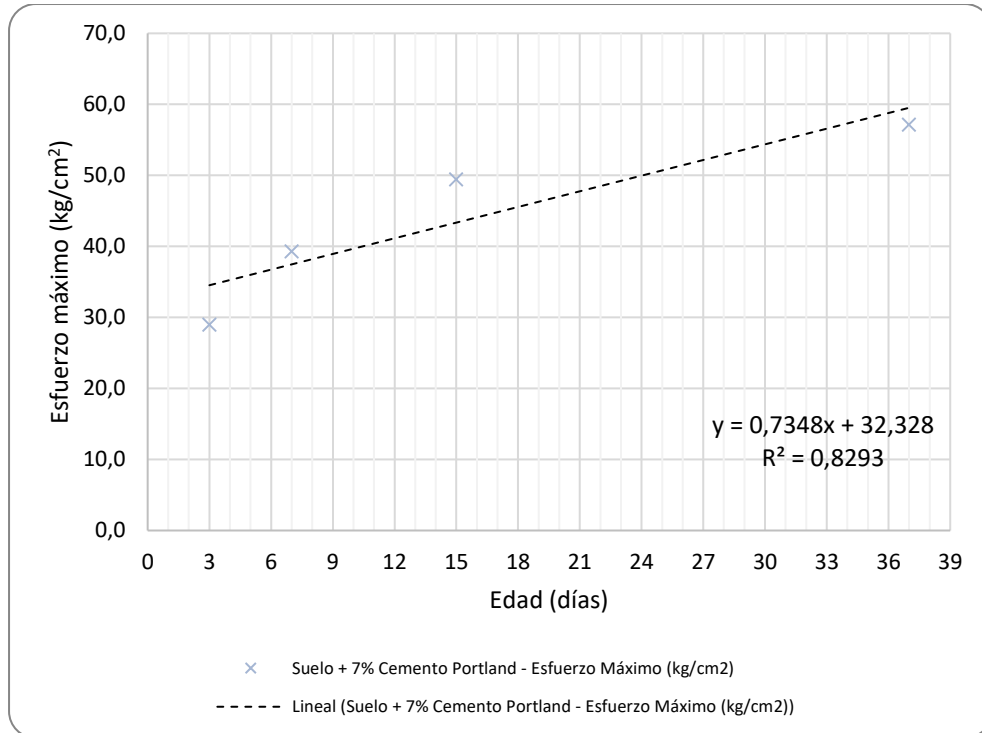


Figura 5-79. Esfuerzo máximo. Suelo + 7.0% Cemento. (Elaboración propia)

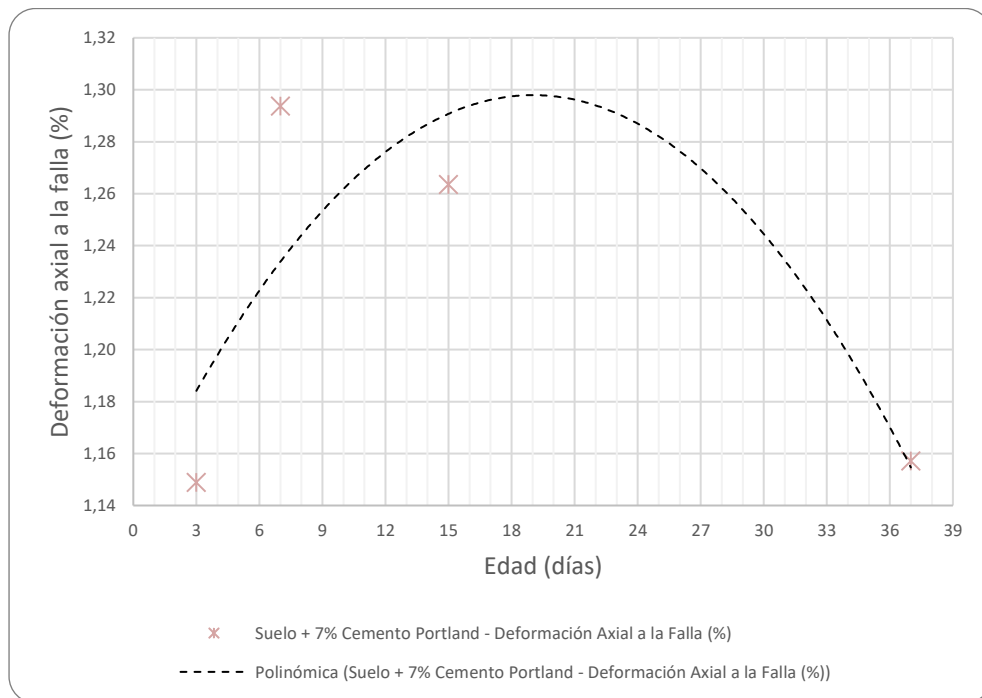


Figura 5-80. Deformación a la falla. Suelo + 7.0% Cemento. (Elaboración propia)

Se observa en la Tabla 5-54 y Figura 5-81, que para las mezclas con cemento por cada 1.0% de concentración del mejorador, genera rendimiento de 3.7 kg/cm² a partir de los 3 días de maduración, 5.2 kg/cm² a partir de los 7 días y encontrando situaciones que oscila entre 6.5 – 6.6 kg/cm² a edades entre 15 y 37 días. Diferenciando entonces una mayor actividad química con mejoras en las propiedades mecánicas del material desde muy temprana edad.

Al igual, que lo expresado anteriormente para las mezclas con cal, dichos resultados son de utilidad para obtener valores a edades tempranas durante un proceso constructivo en función de la concentración de cemento aplicado.

Tabla 5-54. Resistencia según concentración de cemento a diferentes edades. (Elaboración propia)

Esfuerzo máximo (kg/cm ²)			
Suelo + Cemento	Concentración Producto (%)		
Edad	3,0	5,0	7,0
3 días	14,37	22,60	28,99
7 días	18,59	26,79	39,28
15 días	23,38	31,05	49,45
37 días	30,82	56,88	57,15

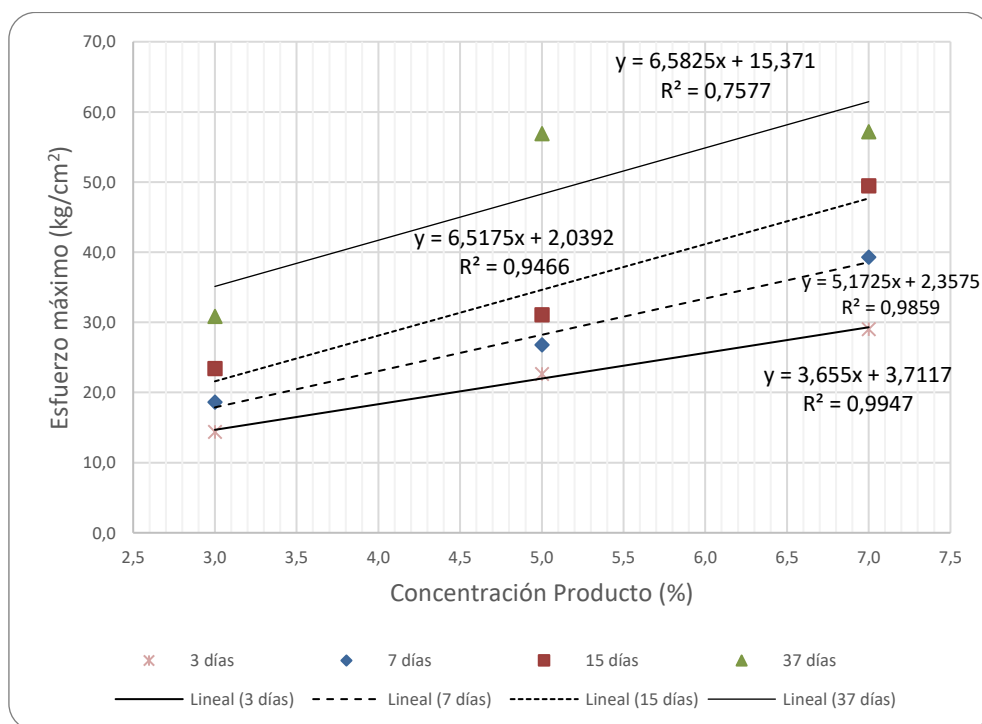


Figura 5-81. Resistencia según concentración de cemento a diferentes edades. (Elaboración propia)

Según Figura 5-82, los aportes en resistencia se evidencian desde una temprana edad.

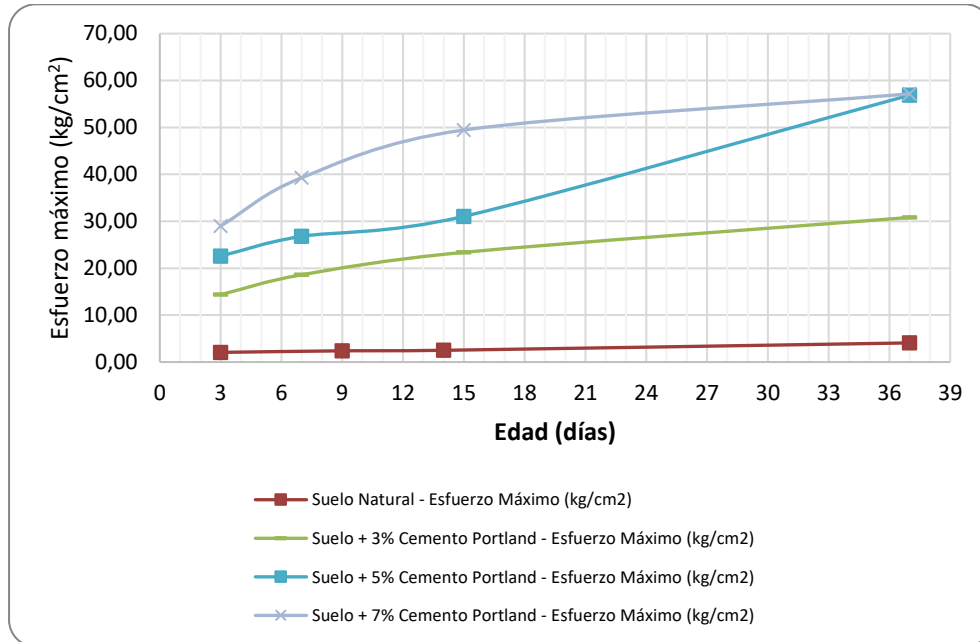


Figura 5-82. Comparativo esfuerzo máximo. Suelo + cemento. (Elaboración propia)

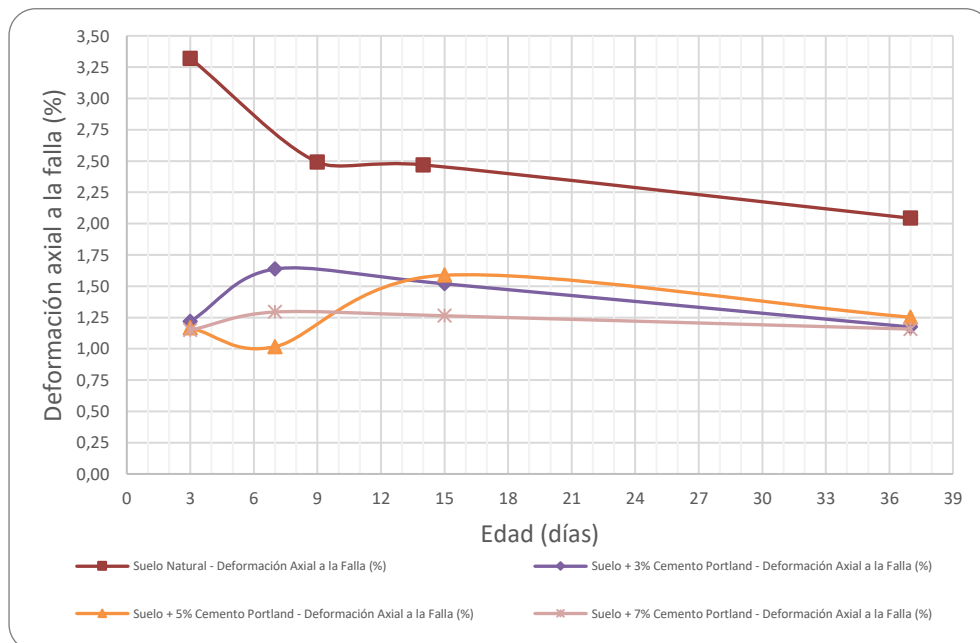


Figura 5-83. Comparativa deformación a la falla. Suelo + cemento. (Elaboración propia)

▪ Velocidad de onda

Mediante el procedimiento establecido en el anexo A, similar a la práctica realizada con el suelo natural, se establece la velocidad de onda para las diferentes concentraciones de cemento. Como resultados, mediante las pruebas de ultrasonido, se pudo obtener:

Tabla 5-55. Velocidad de onda. Suelo + cemento. Edad 12 días. (Elaboración propia)

Probeta No.	Producto Mejorador	Concentración (%)	Edad (días)	Compactación (%)	Esfuerzo máximo (kg/cm ²)	Deformación axial a la falla (%)	Vp (m/s)
28	Suelo Natural	0,0	12	99,8%	2,50	2,47	722
16	Cemento	3,0	12	99,9%	23,38	1,52	1821
20	Cemento	5,0	12	100,4%	31,05	1,59	2179
24	Cemento	7,0	12	100,3%	49,45	1,26	2278

La carga y esfuerzo máximo corresponden a los resultados de compresión simple
Elaboración propia

Tabla 5-56. Velocidad de onda. Suelo + cemento. Edad 37 días. (Elaboración propia)

Probeta No.	Producto Mejorador	Concentración (%)	Edad (días)	Compactación (%)	Esfuerzo máximo (kg/cm ²)	Deformación axial a la falla (%)	Vp (m/s)
28	Suelo Natural	0,0	37	99,8%	4,08	2,04	1027
16	Cemento	3,0	37	99,9%	30,82	1,17	1834
20	Cemento	5,0	37	100,4%	56,88	1,25	2132
24	Cemento	7,0	37	100,3%	57,15	1,16	2240

La carga y esfuerzo máximo corresponden a los resultados de compresión simple
Elaboración propia

Al analizar la Figura 5-84, evidenciamos para los suelos con concentraciones de cemento de 3.0%, 5.0, y 7.0% y edades de curado de 12 y 37 días, que los cambios para las velocidades de onda en las edades de curado son relativamente bajos.

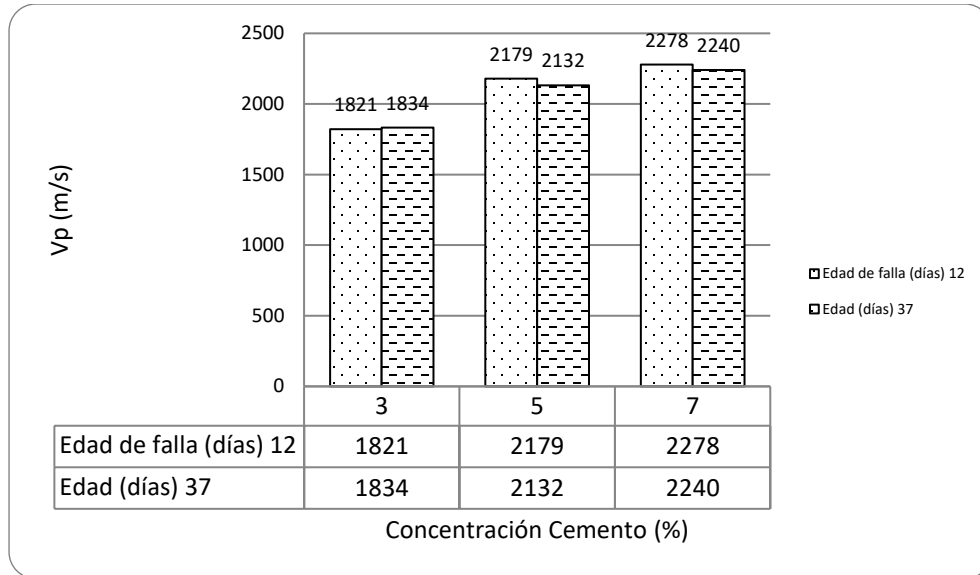


Figura 5-84. Comportamiento de la velocidad de onda según concentración de cemento. (Elaboración propia)

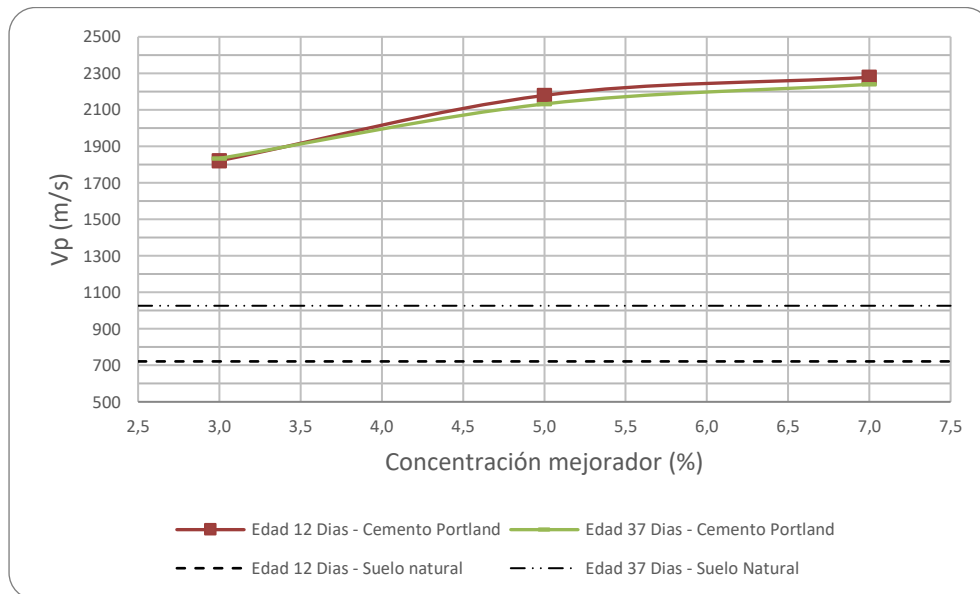


Figura 5-85. Comportamiento de la velocidad de onda según concentración de cemento. (Elaboración propia)

Los aportes que trae consigo en la estructura del suelo el mejoramiento con cemento, según lo describe la velocidad de onda y que se ve reflejado en las propiedades del material, se puede describir de la siguiente manera: Los suelos estabilizados con cemento, con velocidades de onda entre 1821-2278m/s y resistencia a la compresión simple entre 23.38 - 57.15kg/cm², presentan valores superiores a las experiencias con suelo natural y con cal (Figura 5-85 y Figura 5-86).

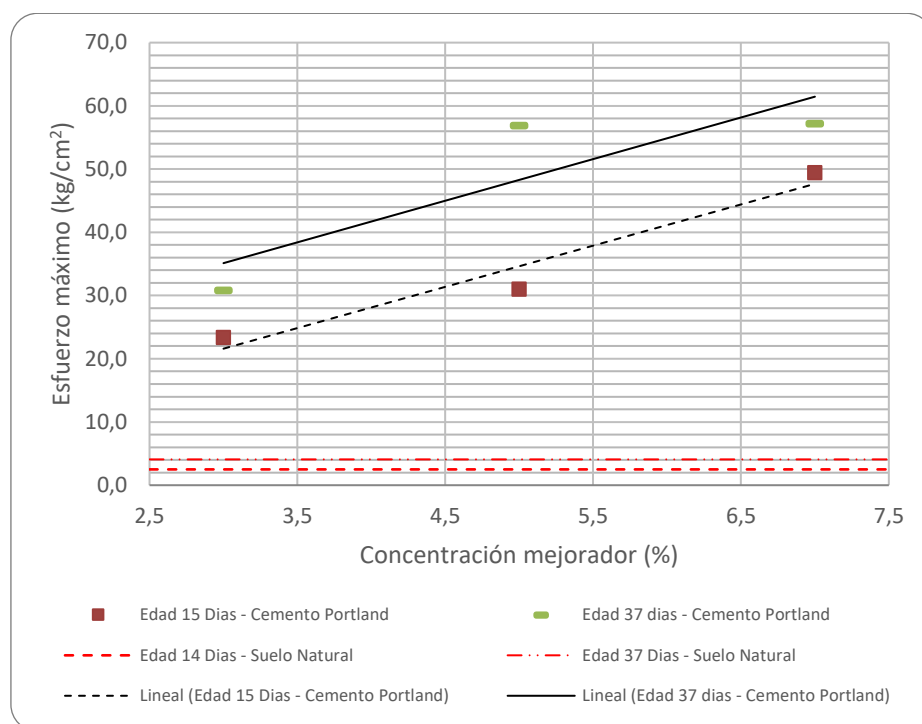


Figura 5-86. Esfuerzo máximo en compresión simple. Suelo + Cemento. (Elaboración propia)

▪ Determinación de la dosificación de trabajo

Tal como se expuso en el numeral 5.3.2 *Suelo mejorado con cemento* y en lo referente al Artículo INVIAS 350-13 “*Suelo Cemento*” (INVIAS, 2013) y a su *Tabla 350-5 Criterios de diseño para mezclas de suelo – cemento*, bajo el criterio de durabilidad y resistencia, se establece valores de resistencia a la compresión simple a 7 días en un rango de 2.10MPa a 4.50MPa (21.0 – 45.0kg/cm²).

Por lo anterior, y según los datos arrojados en las pruebas de compresión simple tal como se muestra en Tabla 5-57 y Figura 5-87, para 7 días de maduración de las muestras suelo cemento y una resistencia a la compresión simple de 21.0kg/cm², hallamos una concentración de cemento del 3.60%.

Tabla 5-57. Resistencia compresión simple. maduración 7 días. (Elaboración propia)

	Suelo + cemento (Sólido) / Falla 7 Días		
Concentración Producto (%)	3,0	5,0	7,0
Esfuerzo Máximo (kg/cm²)	18,59	26,79	39,28

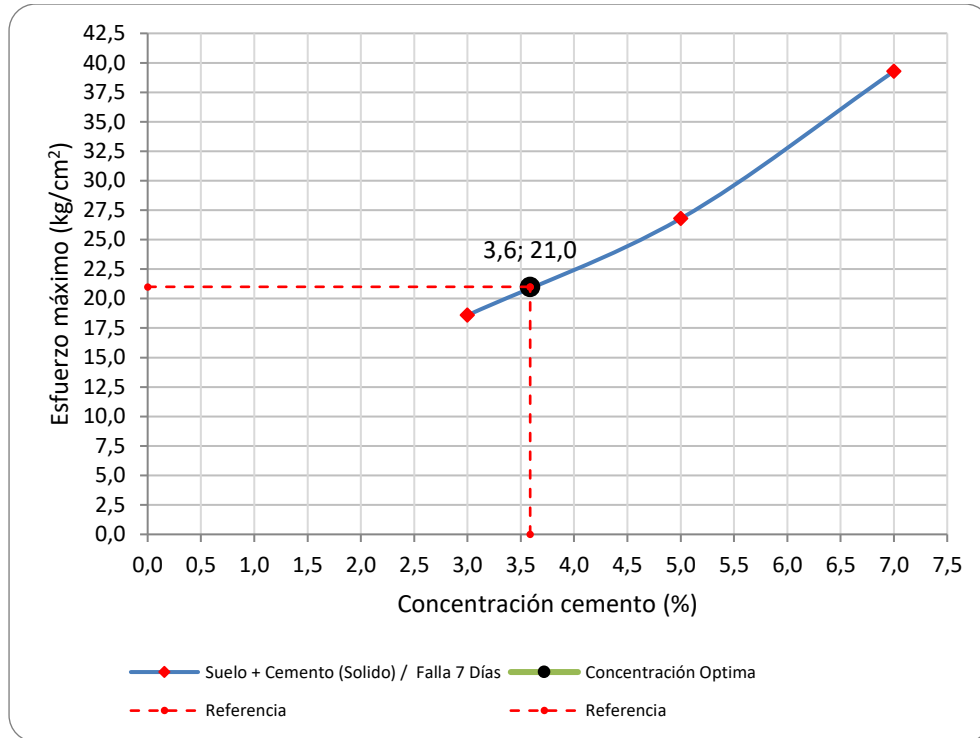


Figura 5-87. Resistencia compresión simple. Falla 7 días. (Elaboración propia)

▪ Módulo de resiliencia

Para evaluación del desempeño, mediante módulo resiliente, en mezclas de suelo + cemento al 3.6%, acorde a la dosificación de trabajo establecida, se elaboran 2 probetas con las características relacionan en la Tabla 5-58.

Tabla 5-58. Datos característicos probetas No. 31 y 34. Suelo + cemento (Elaboración propia)

Probeta No.	31	34
Producto Mejorador	Cemento 3.6%	Cemento 3.6%
Concentración Producto (%)	3,6	3,6
Fecha Elaboración	08-jul-16	08-jul-16
Fecha de Falla	15-jul-16	22-jul-16
Edad de Falla (días)	7	14
Longitud Inicial Probeta (mm)	100,27	100,62
Diámetro Inicial Probeta (mm)	50,31	50,29
Área Inicial Probeta (mm ²)	1987,92	1986,34
Volumen Inicial Probeta (cm ³)	199,33	199,87
Peso unitario seco (gr/cm ³)	1,75	1,75
Compactación %	99,1%	99,0%

Datos Proctor $\gamma_{d,max}$ (gr/cm³) 1,77
 ω_{opt} (%): 15,5%

Como se puede evidenciar en Figura 5-88 y Figura 5-89, las condiciones de densidad y humedad fueron estimadas utilizando como referencia la densidad seca máxima y humedad óptima acorde a los resultados del proctor modificado expuesto en Tabla 5-14.

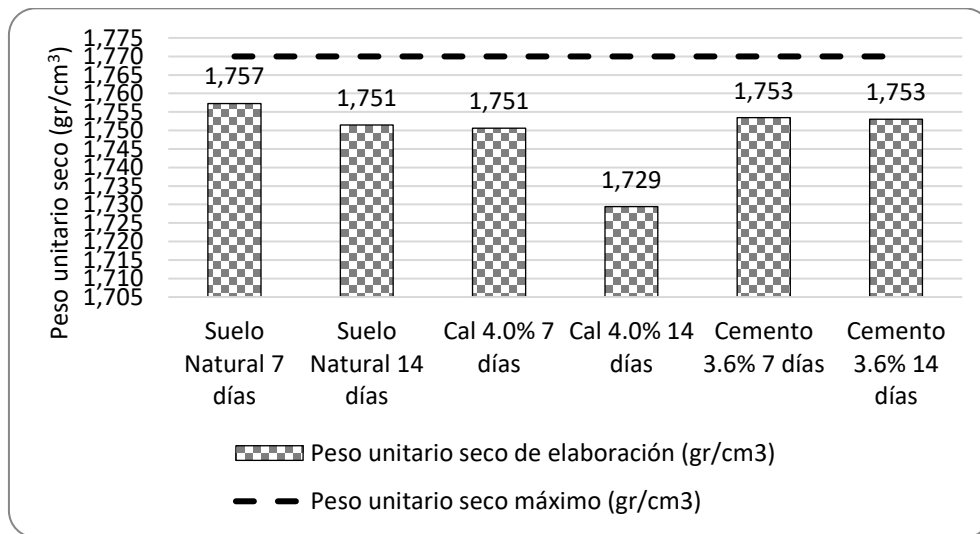


Figura 5-88. Control pesos unitarios para prueba de módulo dinámico. Suelo + cemento (Elaboración propia)

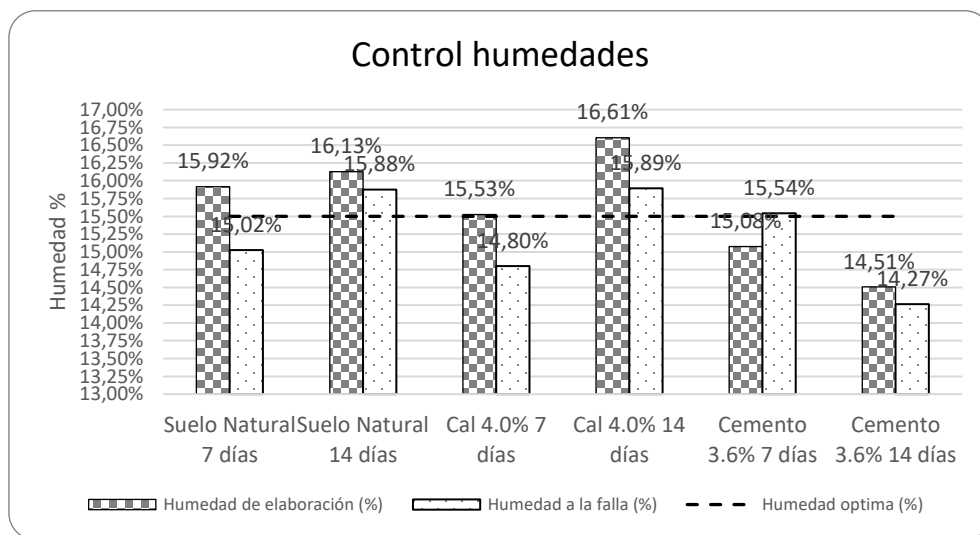


Figura 5-89. Control humedades para prueba de módulo dinámico. Suelo + cemento (Elaboración propia)

En la Figura 5-90, Figura 5-91 y Figura 5-92, para el suelo + cemento 3.6% con edades de curado de 7 y 14 días, un comportamiento de incremento del módulo resiliente - M_r frente al esfuerzo desviador - σ_a aplicado, los cuales a su vez se incrementan con la presión

de cámara. Para los diferentes estados de presión de cámara y esfuerzo desviador durante el número de aplicaciones de carga de la prueba, se encuentran resultados de módulos resilientes para 7 días entre 36.05 – 94.61Mpa y a 14 días entre 35.09 – 116.80MPa, encontrando aumento de resistencia con la edad de curado.

Tabla 5-59. Resultados Módulo Resiliente. Suelo + cemento 3.6%. 7 días. (Elaboración propia)

Suelo + Cemento 3,60% - Falla 7 días			
Cámara	σ_d Aplicado promedio	Deformación resiliente ϵ_r	Módulo Resiliente σ_d/ϵ_r
kPa	kPa	mm/mm	MPa
41,4	20,23	0,0003096	65,36
41,4	13,41	0,0003167	42,34
41,4	21,36	0,0003544	60,26
41,4	30,08	0,0003941	76,32
41,4	35,75	0,0004139	86,37
41,4	43,25	0,0004572	94,61
27,6	18,51	0,0004544	40,74
27,6	23,49	0,0004338	54,15
27,6	30,87	0,0004588	67,28
27,6	37,17	0,0004675	79,51
27,6	44,12	0,0004923	89,62
13,8	16,86	0,0004677	36,05
13,8	22,67	0,0004552	49,80
13,8	33,11	0,0005366	61,71
13,8	35,24	0,0004923	71,59
13,8	49,49	0,0005908	83,76
Máximo:		0,0005908	94,61
Mínimo:		0,0003096	36,05
			Prueba de corte triaxial
Esfuerzo axial máximo (kPa)			1517,43
Deformación Axial a la Falla (%)			1,117%

Tabla 5-60. Resultados Módulo Resiliente. Suelo + cemento 3.6%. 14 días. (Elaboración propia)

Suelo + Cemento 3,60% - Falla 14 días			
Cámara	σ_d Aplicado promedio	Deformación resiliente ϵ_r	Módulo Resiliente σ_d/ϵ_r
kPa	kPa	mm/mm	MPa
41,4	19,28	0,0002425	79,51
41,4	7,60	0,0002167	35,09
41,4	19,11	0,0002526	75,64
41,4	25,43	0,0002713	93,74
41,4	31,58	0,0002984	105,83
41,4	39,33	0,0003367	116,80
27,6	13,42	0,0002910	46,12
27,6	17,43	0,0002604	66,94
27,6	26,04	0,0003061	85,06
27,6	31,01	0,0003220	96,31
27,6	38,80	0,0003461	112,14
13,8	14,42	0,0003478	41,45
13,8	17,15	0,0003099	55,33
13,8	25,51	0,0003518	72,52
13,8	31,18	0,0003608	86,44
13,8	40,44	0,0003792	106,62
Máximo:		0,0003792	116,80
Mínimo:		0,0002167	35,09
			Prueba de corte triaxial
Esfuerzo axial máximo (kPa)			2055,24
Deformación Axial a la Falla (%)			1,260%

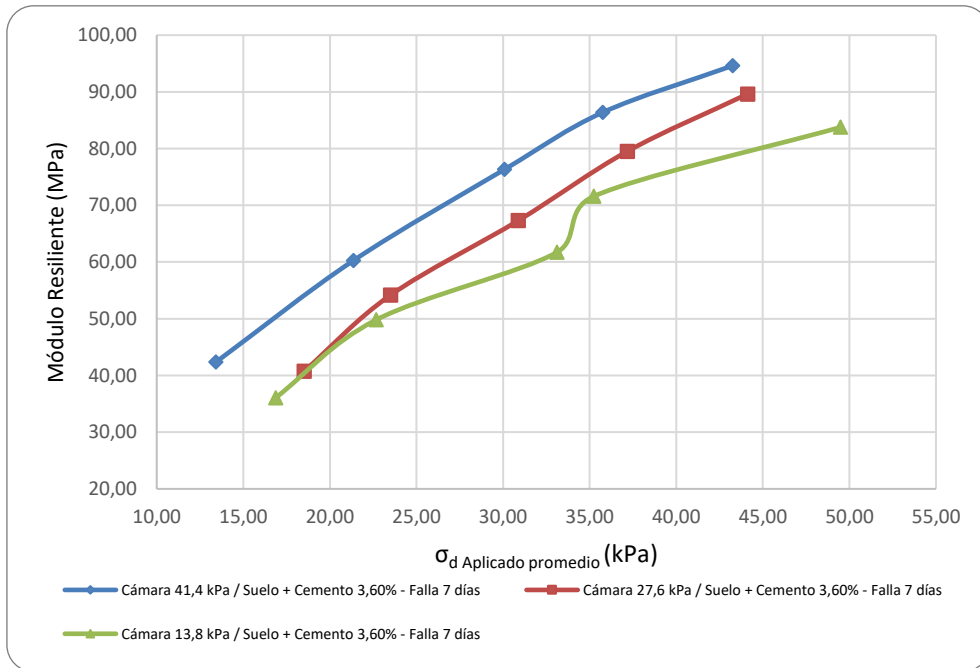


Figura 5-90. Relación entre el Módulo Resiliente y el Esfuerzo Desviador. Suelo + cemento 3.6%. 7 días.
(Elaboración propia)

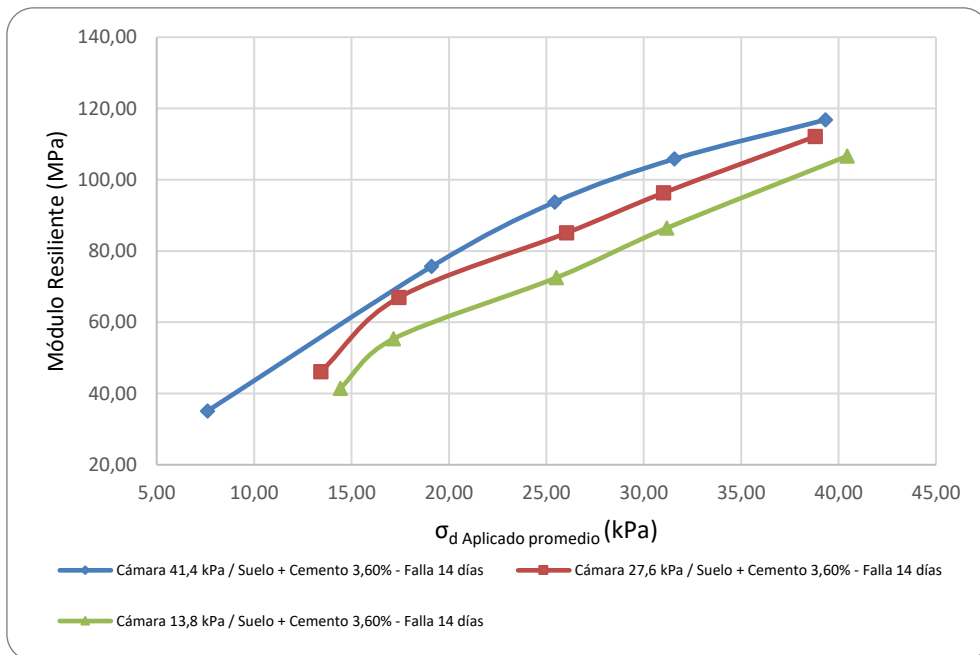


Figura 5-91. Relación entre el Módulo Resiliente y el Esfuerzo Desviador. Suelo + cemento 3.6%. 14 días.
(Elaboración propia)

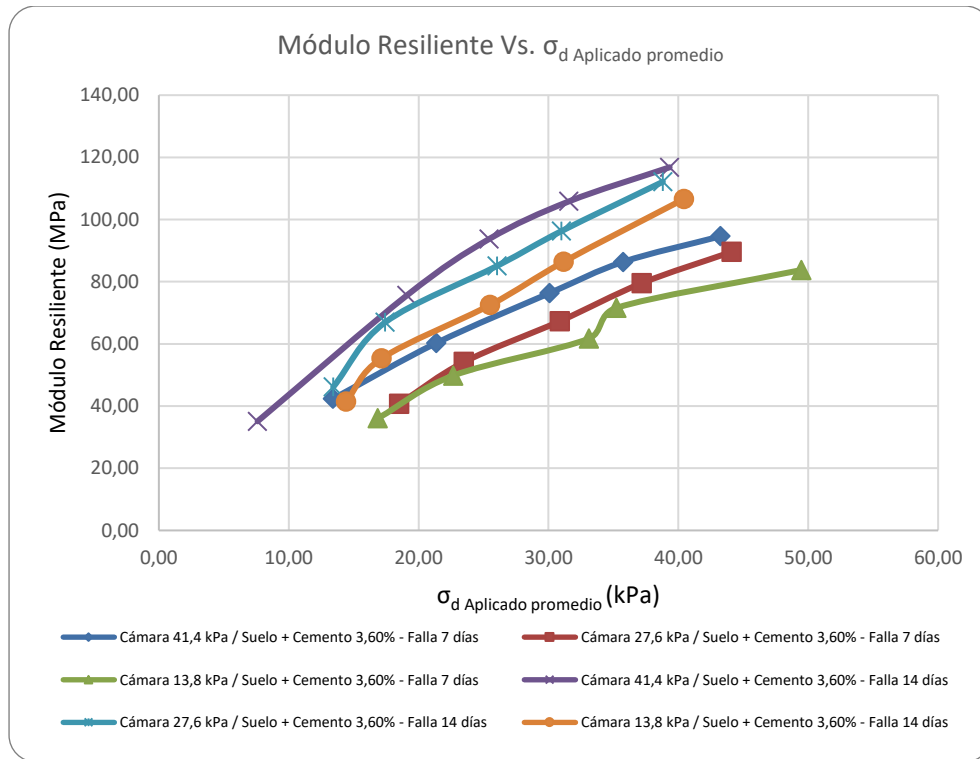


Figura 5-92. Relación entre el Módulo Resiliente y el Esfuerzo Desviador. Suelo + Cemento 3.60%. (Elaboración propia)

Para 7 y 14 días, según Figura 5-92, con presiones de cámara de 41.4, 13.8 y 27.6kPa la edad de curado genera incrementos en el módulo resiliente respectivo para los diferentes esfuerzos desviadores actuantes.

6. Análisis de resultados

A continuación, se realizará un análisis comparativo de la información resultante en la etapa de caracterización básica y de diseño:

6.1 Dosificaciones y/o concentraciones de mejoradores

La siguiente tabla relaciona las concentraciones utilizadas para cada uno de los mejoradores implementados.

Tabla 6-1. Dosificación mejoradores

Producto Mejorador	Concentración Producto (%)
Cal	3,0
	4,0
	5,0
Cemento	3,0
	5,0
	7,0

6.2 Variación del potencial de hidrógeno (pH)

Los resultados arrojados en las experiencias con cal y cemento (Figura 6-1), para los dos mejoradores, demuestran incrementos en el pH del suelo natural y según la calificación del grado de acidez o basicidad se considera como “extremadamente alcalino”. Observando también, que, para los rangos de concentración evaluados, la mezcla con cal ofrece mayor grado de acidez al material.

El incremento del pH del suelo se produce al liberar sílice y alúmina de la arcilla que reacciona con los iones de calcio, formando silicatos y aluminatos cálcicos hidratados que producen incremento en la resistencia mecánica. (Carlos Jofre, 2003).

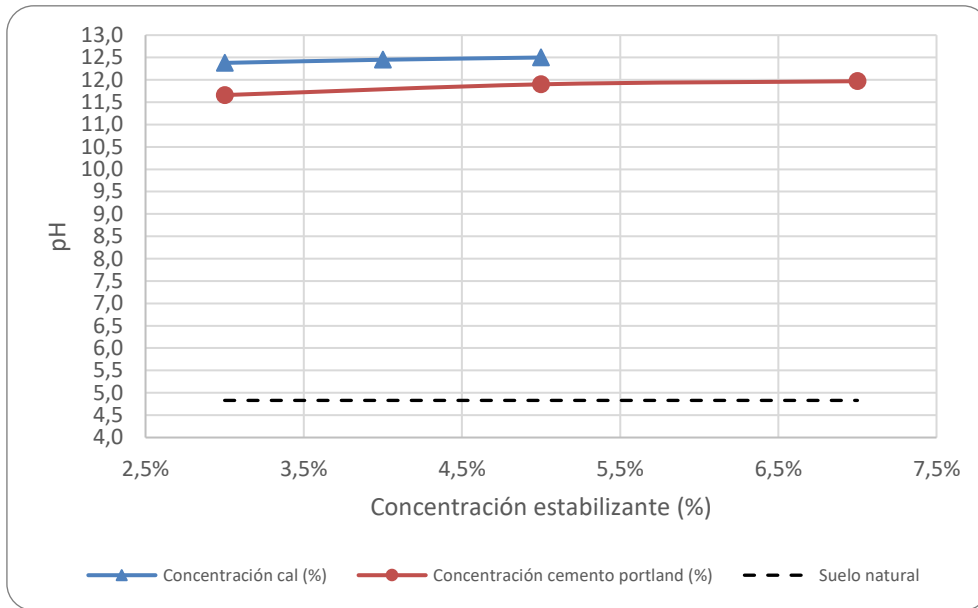


Figura 6-1. pH en mezclas con cal y cemento. (Elaboración propia)

6.3 Humedad durante la reacción química

Podemos encontrar en la Figura 6-2 que la reacción química que produce la mayor pérdida de agua, para los rangos de concentraciones de mejoradores evaluados, se evidencian en la mezcla con cemento (pérdida promedio de humedad de 0.017% por cada minuto).

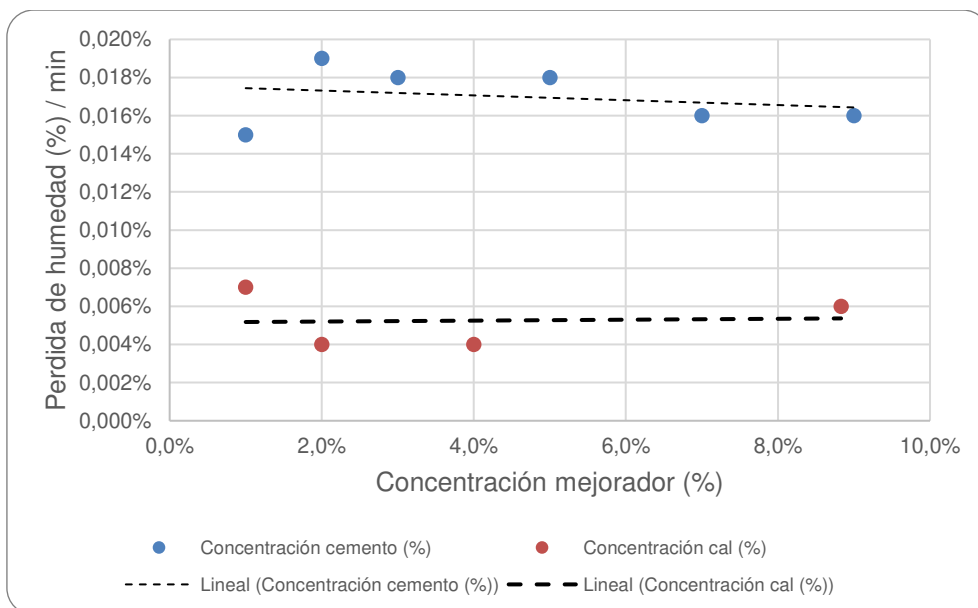


Figura 6-2. Pérdida de humedad durante la reacción química

6.4 Estado hídrico mediante resultados de índice plástico

Previamente determinado el incremento que experimenta el pH del suelo al mezclarlo con cal y cemento, podemos notar mediante Figura 6-3 que tal afectación es más pronunciada en las mezclas con cemento. A su vez, dicho comportamiento en la química del suelo refleja cambios en las propiedades de la materia, disminuyendo su índice de plasticidad. Por tanto, los incrementos en el pH contribuyen a la disminución de la plasticidad del material.

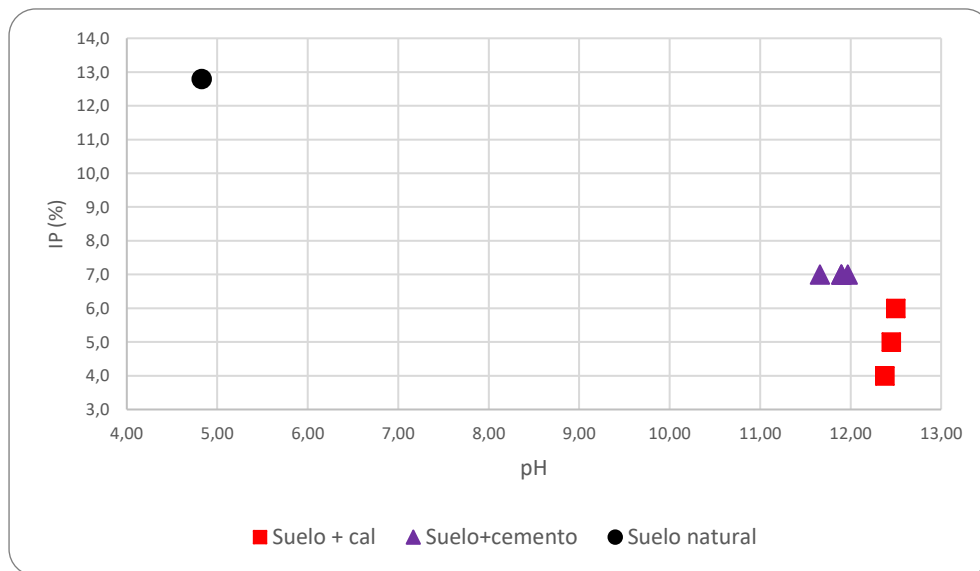


Figura 6-3. Comportamiento IP (%) Vs. pH (Elaboración propia)

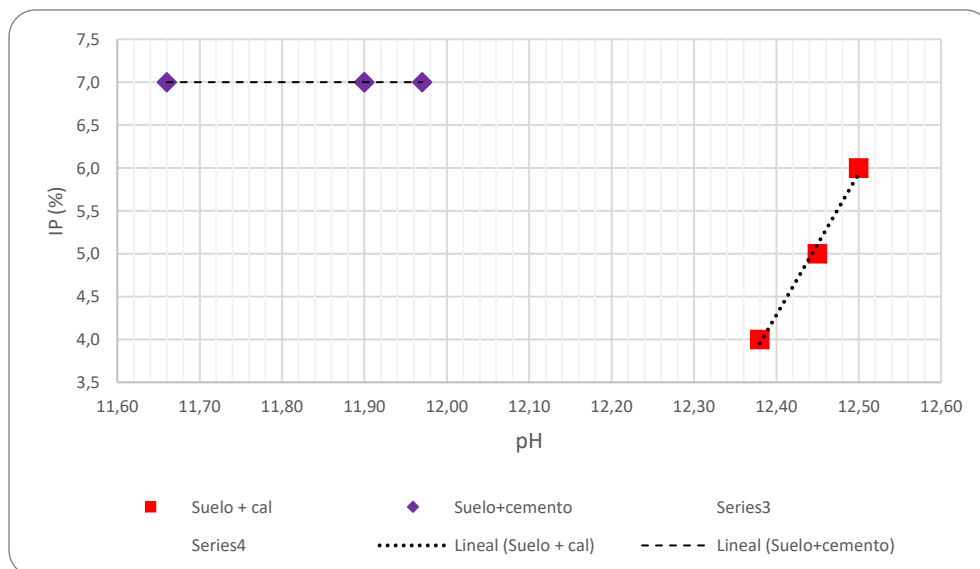


Figura 6-4. Comportamiento IP (%) Vs. pH. Cal y Cemento (Elaboración propia)

En la Figura 6-4 observamos que el índice de plasticidad promedio (IP 7.0%), para las mezclas con cal, es constante para los cambios de concentración utilizados; a diferencia para las concentraciones de cemento, donde el IP incrementa proporcionalmente con la concentración del mejorador. También se observa en dicha figura, que la mayor afectación tanto en el índice de plasticidad como en el potencial de hidrogeno, se desarrolla en las mezclas con cemento.

6.5 Eficacia hidráulica (absorción y succión)

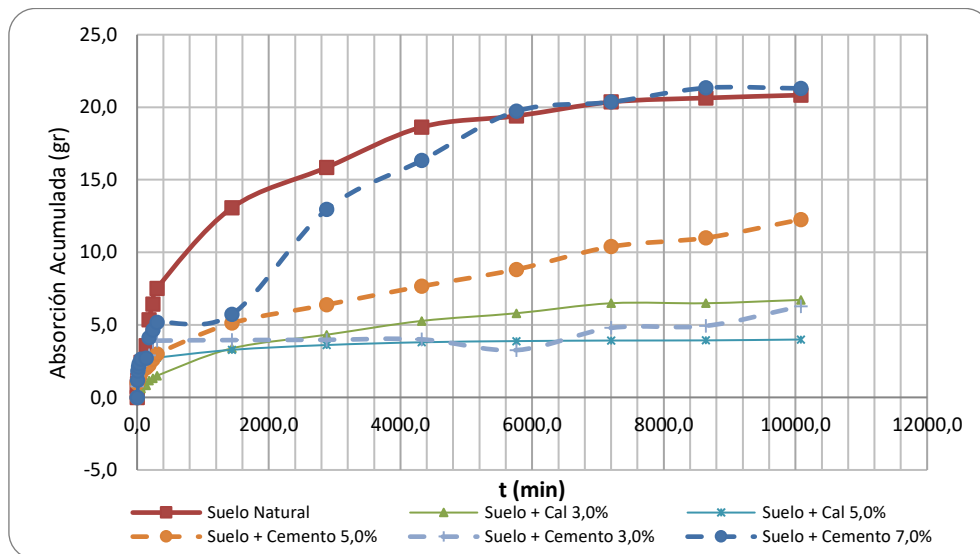


Figura 6-5. Capacidad de retención de agua (Absorción). (Elaboración propia)

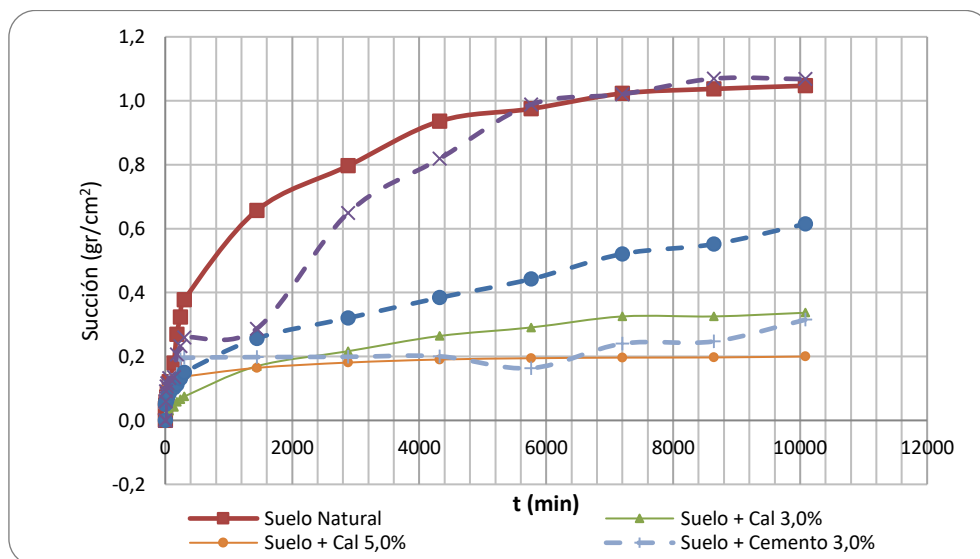


Figura 6-6. Capacidad de retención de agua (Succión). (Elaboración propia)

Mediante Figura 6-5 y Figura 6-6 podemos demostrar que para materiales con concentración de cemento al 3.0% su capacidad de retención de agua es similar a la capacidad de retención que ofrecen las mezclas con cal entre 3.0% y 5.0%.

Tabla 6-2. Capacidad de retención de agua. Cal y cemento. (Elaboración propia)

Material	Tiempo (días)	Absorción acumulada (%)	Succión (gr/cm ²)
Suelo Natural	7,0	5,19%	1,0469
Suelo + Cal 3,0%	7,0	1,72%	0,3368
Suelo + Cal 5,0%	7,0	1,00%	0,2000
Suelo + Cemento 3,0%	7,0	1,58%	0,3148
Suelo + Cemento 5,0%	7,0	3,07%	0,6145
Suelo + Cemento 7,0%	6,0	5,34%	1,0692

Por otro lado, y tal como se muestra esquemáticamente en la Tabla 6-2, los incrementos en la cantidad de cemento aumentan la capacidad de retención de agua, evidenciado que para concentraciones del 7.0% estas son similares a las que se experimenta en el suelo natural. Por el contrario, la concentración de cal disminuye considerablemente la capacidad de absorción de agua en el material (a mayor cantidad de cal menor retención de agua).

6.6 Velocidad de onda (Vp)

Según la Figura 6-7, y en relación con los resultados del suelo natural, con velocidades de onda entre 722m/s (12 días) a 1027m/s (37 días), los incrementos en dichas velocidades se ven pronunciadas para los materiales mejorados con cemento y resultados entre 1821m/s – 2278m/s para los rangos de concentración evaluados. A una menor escala, aun cuando mejora las condiciones del suelo natural en propiedades representadas mediante la velocidad de onda, encontramos los suelos mejorados con cal y valores entre 1039m/s – 1398m/s según su edad de curado.

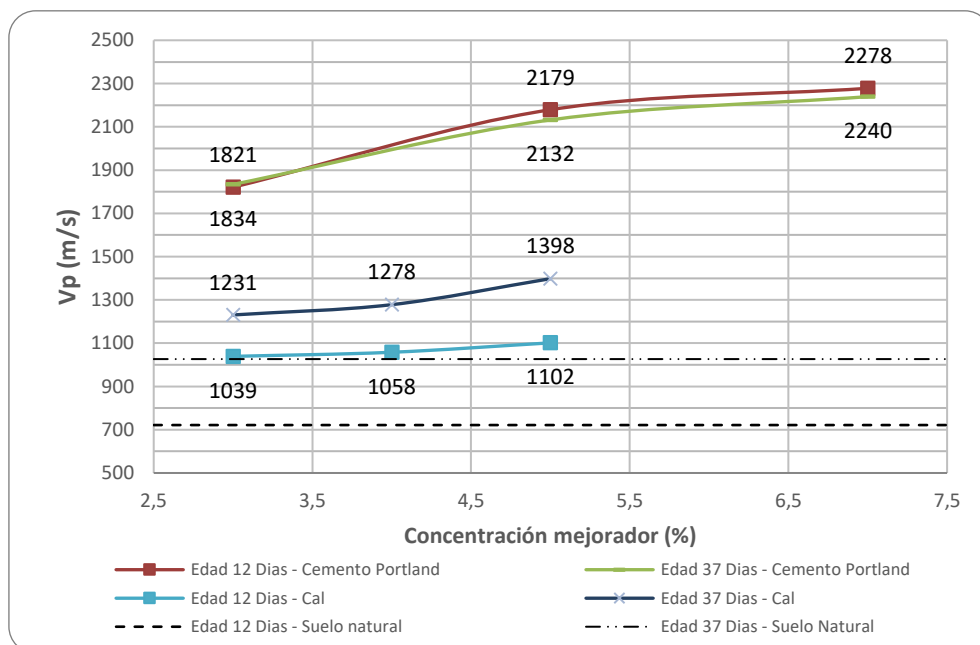


Figura 6-7. Comportamiento de la velocidad de onda. Cal y cemento. (Elaboración propia)

Se puede establecer en la Tabla 6-3, como parámetro de referencia, valores entre 915 – 2750m/s para las ondas compresivas en arcillas saturadas según se presenta en la norma ASTM D 5777 – 00 “*Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation*”. Valores que permiten guardar un grado de proporcionalidad con los reportados en nuestra experiencia que oscilan entre 722-2278m/s según sea tipo de material y su tipo de estabilizante.

Tabla 6-3. Rango de velocidades para ondas compresivas en el suelo y la roca. (Fuente ASTM D 5777)

Materials	Velocity	
	ft/s	m/s
Natural Soil and Rock		
Weathered surface material	800 to 2000	240 to 610
Gravel or dry sand	1500 to 3000	460 to 915
Sand (saturated)	4000 to 6000	1220 to 1830
Clay (saturated)	3000 to 9000	915 to 2750
Water [^]	4700 to 5500	1430 to 1665
Sea water [^]	4800 to 5000	1460 to 1525
Sandstone	6000 to 13 000	1830 to 3960
Shale	9000 to 14 000	2750 to 4270
Chalk	6000 to 13 000	1830 to 3960
Limestone	7000 to 20 000	2134 to 6100
Granite	15 000 to 19 000	4575 to 5800
Metamorphic rock	10 000 to 23 000	3050 to 7000

[^]Depending on temperature and salt content.

6.7 Determinación de la dosificación de trabajo

Tal como se definió en el numeral “5.3 Fase de diseño con estabilizantes y desempeño de las mezclas”, a continuación se presenta la dosificación de trabajo para cada una de las mezclas:

Tabla 6-4. Dosificación de trabajo. Cal y cemento. (Elaboración propia)

Dosificación de trabajo (%)	
Cal	Cemento
4,0	3,6

6.8 Módulo de resiliencia

Para el análisis del módulo resiliente según el tipo de material y bajo las mismas condiciones de presión de cámara, a continuación, se evaluará el comportamiento de dicho módulo y su esfuerzo desviador.

La Figura 6-8 permite establecer mediante Ecuación 6-1 a Ecuación 6-3 un modelo matemático para el comportamiento de M_r y esfuerzo desviador para el suelo de estudio (edades de curado de 7 días para suelo natural y de 14 días para suelo con mezcla de cal y cemento). Dicha figura describe similar comportamiento al presentado en las Figura 5-35 y Figura 5-36 para suelos arcillosos y presiones de cámara de 13.8kPa.

$$M_r (MPa) = -0,0177x^2 + 3,3652x - 0,8307 \text{ (Suelo + Cemento 3.6\%)}. \text{ Ecuación 6-1}$$

$$M_r (Pa) = -0,0225x^2 + 2,7681x - 4,9513 \text{ (Suelo + Cal 4.0\%)}. \text{ Ecuación 6-2}$$

$$M_r (MPa) = -0,0015x^2 + 1,1665x + 17,027 \text{ (Suelo Natural)}. \text{ Ecuación 6-3}$$

M_r = Módulo resiliente (MPa)

x = Esfuerzo desviador (kPa)

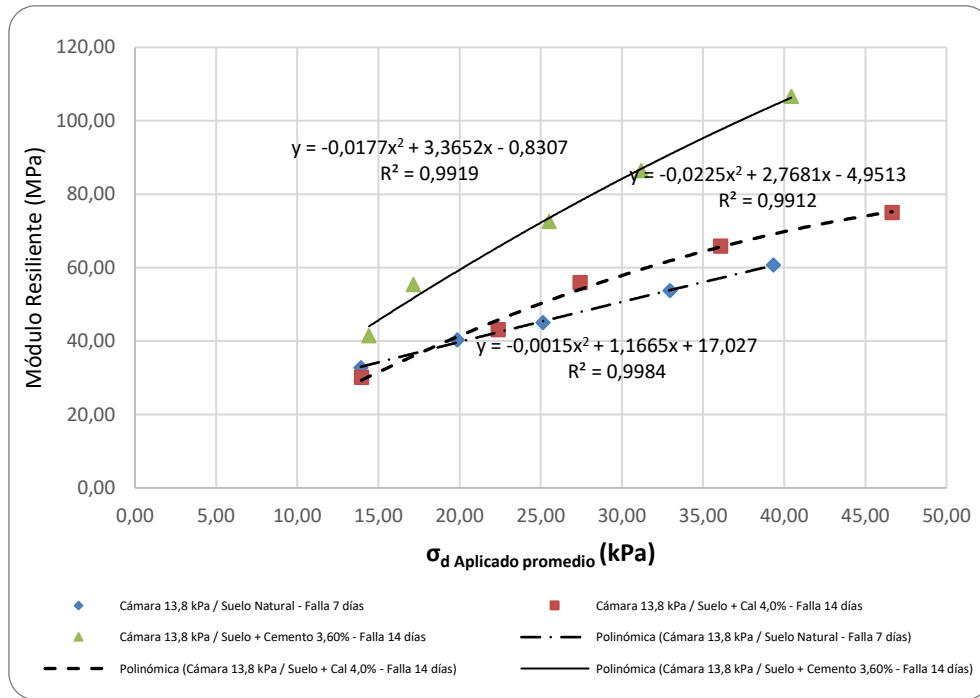


Figura 6-8. Relación entre el Módulo Resiliente y el Esfuerzo Desviador. Presión de cámara 13,8kPa. (Elaboración propia)

La Figura 6-9 permite establecer mediante Ecuación 6-4 a Ecuación 6-6 un modelo matemático para el comportamiento de M_r y esfuerzo desviador para el suelo de estudio. Evidenciando mínimos aportes de la cal en los resultados del módulo. Se conserva la tendencia al comportamiento descrito en las Figura 5-35 y Figura 5-36 para suelos arcillosos y presiones de cámara de 23,6kPa.

$$M_r \text{ (MPa)} = -0,0402x^2 + 4,5517x - 4,8801 \text{ (Suelo + Cemento 3.6\%)}. \text{ Ecuación 6-4}$$

$$M_r \text{ (MPa)} = -0,0578x^2 + 4,9603x - 29,091 \text{ (Suelo + Cal 4.0\%)}. \text{ Ecuación 6-5}$$

$$M_r \text{ (MPa)} = -0,0418x^2 + 3,7375x - 9,6179 \text{ (Suelo Natural)}. \text{ Ecuación 6-6}$$

M_r = Módulo resiliente (MPa)

x = Esfuerzo desviador (kPa)

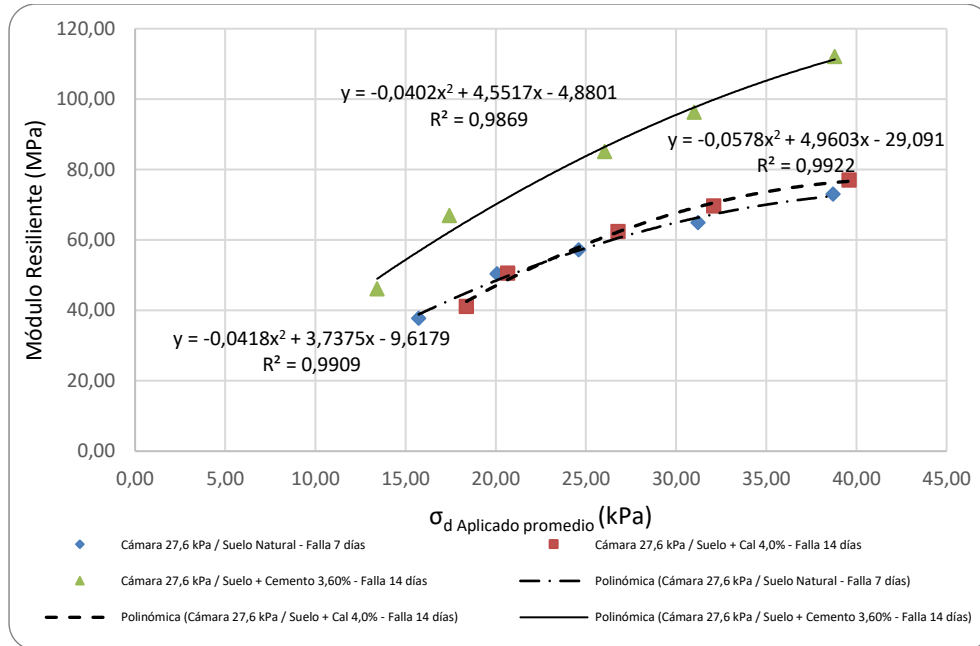


Figura 6-9. Relación entre el Módulo Resiliente y el Esfuerzo Desviador. Presión de cámara 23.6kPa. (Elaboración propia)

Para presiones de cámara de 41.4kPa y guardando el comportamiento descrito en las Figura 5-35 y Figura 5-36 para suelos arcillosos, la Figura 6-10 permite establecer mediante Ecuación 6-7 a Ecuación 6-9 un modelo matemático para el comportamiento de M_r y esfuerzo desviador para el suelo de estudio. Evidenciando mínimos aportes de la cal en los resultados del módulo.

$$M_r (MPa) = -0,0492x^2 + 4,8887x + 0,6705 \text{ (Suelo + Cemento 3.6\%)}. \text{ Ecuación 6-7}$$

$$M_r (MPa) = -0,0543x^2 + 4,0833x + 0,8234 \text{ (Suelo + Cal 4.0\%)}. \text{ Ecuación 6-8}$$

$$M_r (MPa) = -0,0667x^2 + 4,417x + 1,6225 \text{ (Suelo Natural)}. \text{ Ecuación 6-9}$$

M_r = Módulo resiliente (MPa)

x = Esfuerzo desviador (kPa)

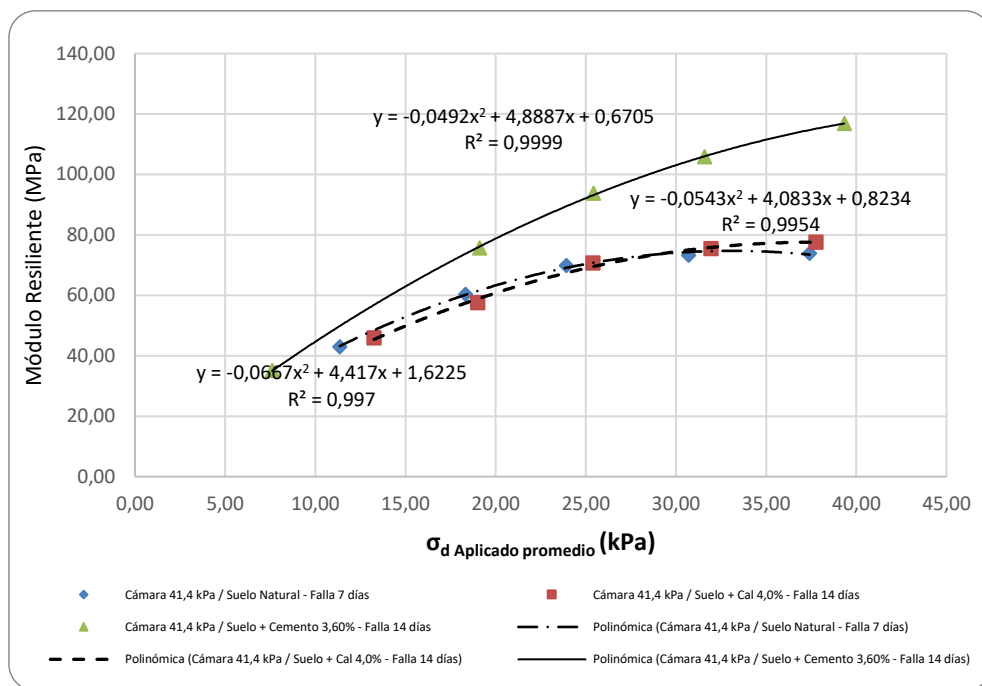


Figura 6-10. Relación entre el Módulo Resiliente y el Esfuerzo Desviador. Presión de cámara 41.4kPa. (Elaboración propia)

El ensayo de módulo resiliente, en su etapa final, permite determinar la carga axial máxima resistente del suelo mediante una prueba rápida de corte aplicando una presión de cámara de 27.6kPa; dichos resultados se pueden evidenciar en la Tabla 6-5.

Tabla 6-5. Esfuerzo axial máximo prueba de corte triaxial. (Elaboración propia)

	Días de falla	Esfuerzo axial máximo (kPa)
Suelo Natural	7	228,67
	14	733,35
Suelo + Cal 4,0%	7	875,64
	14	917,34
Suelo + Cemento 3,60%	7	1517,43
	14	2055,24

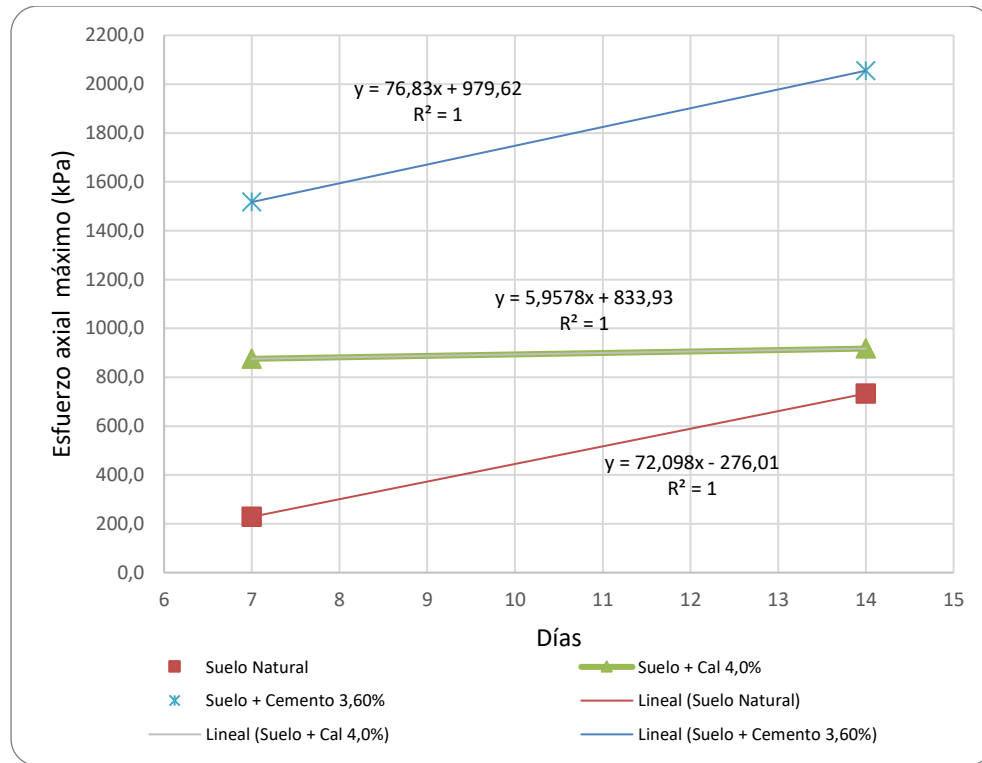


Figura 6-11. Comportamiento esfuerzo axial máximo según prueba de corte triaxial. (Elaboración propia)

Para las situaciones descritas, se puede demostrar en la Figura 6-11 aportes mínimos que ofrece el curado para el material mezclado con cal. Las mezclas de suelo con cemento describen aportes considerables en el esfuerzo axial máximo y ganancias de 76.83kPa por cada día de curado. El suelo natural debido a su tixotropía muestra aportes de 72.10kPa por cada día de curado.

La presión de confinamiento de la prueba triaxial según Tabla 6-5, permite encontrar valores superiores para las muestras de suelo natural y cal al 4.0%, en las edades de curado respectivamente, a los reportados en las pruebas de compresión simple según *Tabla 5-18. Resultados compresión simple. Suelo natural.* y *Tabla 5-35. Resultados compresión simple. Suelo + 4.0% Cal.*

6.9 Resumen de resultados

Como resumen de las diferentes pruebas realizadas a los materiales evaluados, se presenta a continuación una serie de tablas resumen con los diferentes datos analizados:

Tabla 6-6. Resumen propiedades intrínsecas de los materiales. (Elaboración propia)

Propiedades	Suelo Natural	Producto Mejorador					
		Cal			Cemento		
Concentración Producto (%)	0,0	3,0	4,0	5,0	3,0	5,0	7,0
Límite Líquido (%)	32	29	30	30	30	30	28
Límite Plástico (%)	19	25	25	24	23	23	21
Índice de Plasticidad (%)	13	4	5	6	7	7	7
Potencial de hidrógeno (pH)	4,83	12,38	12,45	12,50	11,66	11,90	11,97

Elaboración Propia

Tabla 6-7. Resumen propiedades hidráulicas. (Elaboración propia)

Material	Tiempo (días)	Absorción acumulada (%)	Succión (gr/cm ²)	Reducción o incremento (%)*	
				Absorción Acumulada (gr)	Succión (gr/cm ²)
Suelo Natural	7,0	5,19%	1,0469		
Suelo + Cal 3,0%	7,0	1,72%	0,3368	66,9%	67,8%
Suelo + Cal 5,0%	7,0	1,00%	0,2000	80,7%	80,9%
Suelo + Cemento 3,0%	7,0	1,58%	0,3148	69,5%	69,9%
Suelo + Cemento 5,0%	7,0	3,07%	0,6145	40,8%	41,3%
Suelo + Cemento 7,0%	6,0	5,34%	1,0692	-2,8%	-2,1%

Elaboración propia

* Reducción o incremento en relación a la condición del suelo natural

Tabla 6-8. Resumen propiedades mecánicas (Compresión simple. Natural y cal). (Elaboración propia)

Propiedades	Suelo Natural				Producto Mejorador											
					Cal											
Concentración Producto (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	3,0	3,0	3,0	4,0	4,0	4,0	4,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Edad de Falla (días)	3	9	14	37	3	7	14	37	3	7	14	37	3	7	14	37
Esfuerzo Máximo (kg/cm ²)	2,06	2,39	2,50	4,08	5,85	7,81	7,10	12,03	6,86	5,62	8,54	14,31	6,26	7,29	8,88	19,11
Deformación Axial a la Falla (%)	3,32	2,49	2,47	2,04	1,57	2,01	1,33	1,53	1,71	1,49	1,43	1,60	1,27	1,40	1,68	1,57

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-9. Resumen propiedades mecánicas (Compresión simple. Natural y cemento). (Elaboración propia)

Propiedades	Suelo Natural				Producto Mejorador											
					Cemento											
Concentración Producto (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	3,0	3,0	3,0	5,0	5,0	5,0	5,0	7,0	7,0	7,0	7,0
Edad de Falla (días)	3	9	14	37	3	7	15	37	3	7	15	37	3	7	15	37
Esfuerzo Máximo (kg/cm ²)	2,06	2,39	2,50	4,08	14,37	18,59	23,38	30,82	22,60	26,79	31,05	56,88	28,99	39,28	49,45	57,15
Deformación Axial a la Falla (%)	3,32	2,49	2,47	2,04	1,22	1,64	1,52	1,17	1,17	1,02	1,59	1,25	1,15	1,29	1,26	1,16

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-10. Resumen propiedades mecánicas (Velocidad de onda. Falla 7 días). (Elaboración propia)

Probeta No.	Producto Mejorador	Concentración (%)	Edad de falla (días)	Compactación (%)	Esfuerzo máximo (kg/cm ²)	Deformación axial a la falla (%)	Velocidad de onda (m/s)
28	Suelo Natural	0,0	12	99,8%	2,50	2,47	722
4	Cal	3,0	12	99,5%	7,10	1,33	1039
8	Cal	4,0	12	98,9%	8,54	1,43	1058
12	Cal	5,0	12	99,7%	8,88	1,68	1102
16	Cemento Portland	3,0	12	99,9%	23,38	1,52	1821
20	Cemento Portland	5,0	12	100,4%	31,05	1,59	2179
24	Cemento Portland	7,0	12	100,3%	49,45	1,26	2278

La carga y esfuerzo máximo corresponden a los resultados de compresión simple

Elaboración propia

Tabla 6-11. Resumen propiedades mecánicas (Velocidad de onda. Falla 37 días). (Elaboración propia)

Probeta No.	Producto Mejorador	Concentración (%)	Edad (días)	Compactación (%)	Esfuerzo máximo (kg/cm ²)	Deformación axial a la falla (%)	Velocidad de onda (m/s)
28	Suelo Natural	0,0	37	99,8%	4,08	2,04	1027
4	Cal	3,0	37	99,5%	12,03	1,53	1231
8	Cal	4,0	37	98,9%	14,31	1,60	1278
12	Cal	5,0	37	99,7%	19,11	1,57	1398
16	Cemento Portland	3,0	37	99,9%	30,82	1,17	1834
20	Cemento Portland	5,0	37	100,4%	56,88	1,25	2132
24	Cemento Portland	7,0	37	100,3%	57,15	1,16	2240

La carga y esfuerzo máximo corresponden a los resultados de compresión simple

Elaboración propia

Tabla 6-12. Resumen propiedades mecánicas (Módulo resiliente. Falla 7 y 14 días). (Elaboración propia)

Propiedades	Producto Mejorador				
	Suelo Natural	Cal		Cemento	
Concentración Producto (%)	0,0	4,0		3,6	
Edad de Falla (días)	7	7	14	7	14
*Módulo Resiliente (Mpa). Presión de cámara 41,4kPa	42,98 - 73,89	45,08 - 90,91	45,87 - 77,55	42,34 - 94,61	35,09 - 116,80
*Módulo Resiliente (Mpa). Presión de cámara 27,6kPa	37,75 - 73,01	39,83 - 85,15	41,11 - 76,99	40,74 - 89,62	46,12 - 112,14
*Módulo Resiliente (Mpa). Presión de cámara 13,8kPa	32,69 - 60,71	28,44 - 79,66	30,08 - 74,99	36,05 - 83,76	41,45 - 106,62
Corte triaxial. Esfuerzo axial máximo (kg/cm ²)	2,29	8,76	9,17	15,17	20,55
Corte triaxial. Deformación Axial a la Falla (%)	1,65%	1,28%	1,28%	1,12%	1,26%

* Para los diferentes esfuerzos desviadores aplicados (σ_d Aplicado promedio)

Fuente: Elaboración propia

Como pruebas paralelas a los resultados de compresión simple realizadas a las mezclas con cal y cemento, se practicaron pruebas a mezclas de suelo con suelo calcinado al 7.0% y 10.0%, las cuales arrojaron aportes en resistencia relativo a los resultados obtenidos con el suelo natural, tal como se muestra en la Figura 6-12. Óbice referente para futuras investigaciones frente a los beneficios económicos que pudiera ofrecer el desempeño de los materiales de suelo natural mejorados con suelos residuos de calcinación, al ser modificadas las propiedades cementantes.

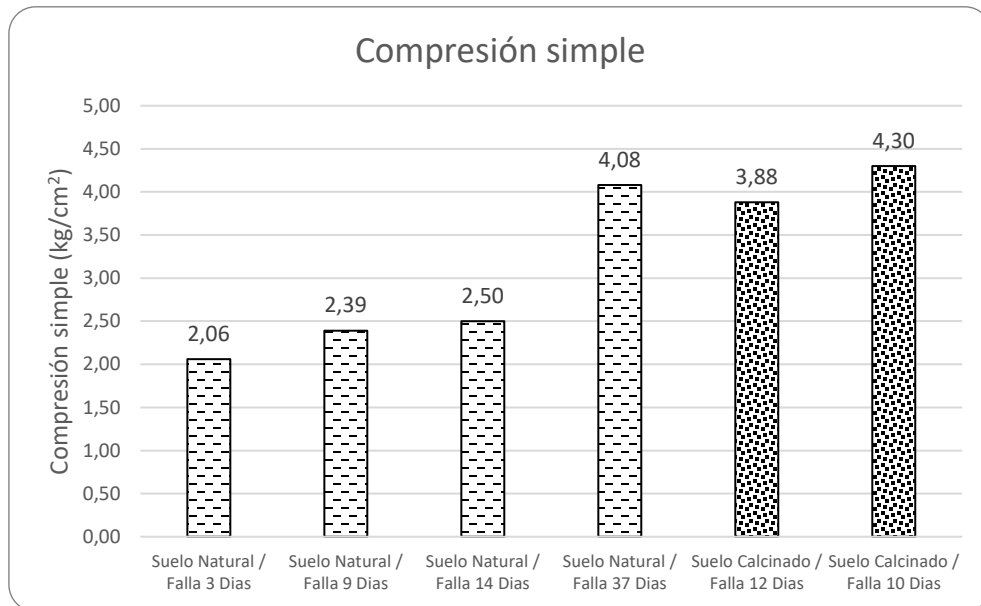


Figura 6-12. Resultados compresión simple suelo natural y mezclado con suelo calcinado al 7.0% y 10.0%. (Elaboración propia)

7. Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

- **Suelo natural**
- La campaña exploratoria y de muestreo desarrollada entre el municipio de La Primavera y La Defensa (Caño La Defensa) en una longitud aproximada de 60.0km, ubicado sobre el trazado y zonas aledañas del corredor vial que del municipio de La Primavera conduce al municipio de Puerto Carreño, caracteriza predominantemente como un material arcilloso de baja plasticidad *CL* de color rojizo, con rangos de variación de índices de plasticidad entre 8.1% – 13.4% y límite líquido entre 26.2% - 32.1%, una matriz fina cuyo gran componente de partículas que pasan el tamiz de 75µm oscila entre el 59.7% – 97.5%. Se encontró, Skempton (1993), una actividad *A* para los materiales analizados con valores menores $A < 0,75$ clasificando como una arcilla inactiva de bajo potencial de cambio volumétrico.

Dicha clasificación de arcilla inactiva obedece al tipo Caolinita, lo que difiere de los resultados encontrados en el análisis por difracción de rayos X (DRX), donde este reporta un porcentaje de solo el 3.7% de dicho mineral.

- En lo que respecta a la condición de limpieza, materia orgánica y/o de presencia partículas perjudiciales o cantidad de material potencialmente dañino, según las pruebas de azul de metileno con resultados entre 0.5 – 3.5mg/g y de materia orgánica en porcentaje de pérdida por ignición del 2.0%, se considera el material como de baja actividad.
- Para un estado químico del suelo natural que de una situación acida pasa a un escenario alcalino o básico al ser mezclado con cal o cemento, experimenta de una

forma representativa un pH más básico, con valores entre 12.38 y 12.50, en respuesta a las mezclas con cal.

- Mediante eficacia hidráulica, para la evaluación de la capacidad de retención de agua (absorción y succión), y para los suelos naturales bajo condiciones de humedad óptima y densidad máxima seca con tiempos de curado de 7 días, se encontraron resultados de absorción acumulada de 5.19% y succión 1.0469gr/cm².
- La capacidad de densificación del material, definida mediante pruebas de proctor modificado, revelan unos resultados de densidad seca máxima que oscila entre 1710 - 1815kg/m³ y humedad óptima entre 14.7% - 18.2%.
- Los valores de resistencia a la penetración promedio C.B.R. (%), según correlación con las pruebas de penetrómetro dinámico de cono PDC, arrojan promedio entre el 6.3% a 0.7% a profundidades de 0.30m a 1.50m.
- En estado natural, los materiales analizados y comparados con el Artículo 220-13 *Terraplenes* de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras (Instituto Nacional de Vías - INVIAS, 2013) en lo que respecta a las recomendaciones para los materiales de estructuras de terraplén (Corona, Núcleo y Cimiento), no cumplen con dichas recomendaciones.
- Resumido en Tabla 6-8 y Tabla 6-9, podemos considerar según las edades de maduración de 3 a 37 días, que los resultados de resistencia a compresión simple oscilan entre 2.06 – 4.08 kg/cm² (206 - 408 kPa) los cuales incrementan proporcionalmente a la edad de curado, y que según Tabla 5-19 el suelo natural presenta una consistencia de muy firme a dura.
- El comportamiento de suelo natural, con la edad de curado, describe un incremento en las velocidades de onda de 722m/s (12 días) a 1027m/s (37 días), incremento del 42.3%.

- Bajo estado de cargas cíclicas y en aras de determinar el desempeño de los materiales analizados, se encontró que, mediante pruebas de módulo resiliente para los suelos en estado natural con una edad de curado de 7 días, el comportamiento de incremento del módulo resiliente - M_r frente al esfuerzo desviador - σ_a aplicado, se incrementan con la presión de cámara. Para los diferentes estados de presión de cámara y esfuerzo desviador durante el número de aplicaciones de carga de la prueba, se encuentran resultados de módulos resilientes entre 32.69 - 73.89Mpa. Manifestando la tendencia que presentan los suelos arcillosos con una succión alta.
- El módulo resiliente de la subrasante para el suelo objeto de estudios, a profundidades entre 0.30 – 0.44m y determinado indirectamente mediante las correlaciones propuestas por la AASHTO (AASHTO, 1993) a través de los resultados del ensayo de CBR, presenta valores entre 64.96 - 126.44MPa, valores que guardan un orden de proporción aceptables a los encontrados directamente mediante prueba de módulo resiliente, los cuales para los diferentes estados de presión de cámara y esfuerzo desviador durante el número de aplicaciones de carga de la prueba, resultan entre 32.69 - 73.89Mpa a edades de maduración de 7 días.
- Mediante una prueba rápida de corte aplicando una presión de cámara de 27.6kPa, la prueba de módulo resiliente permitió obtener resultados de carga axial máxima resistente del suelo bajo condiciones de confinamiento, reportaron valores a 14 días de curado para suelo natural de 733kPa (7.33kg/cm²).
- **Suelo mejorado con cal**
 - Conforme a las características básicas encontradas para el material natural predominante de la zona, se define como unos de los estabilizantes a la cal hidratada en concentraciones de 3.0%, 4.0% y 5.0%. Para la evaluación de las propiedades mecánicas se realizan pruebas de ensayos a edades aproximadas de maduración de 3, 7, 14 y 30 días.
 - Para las mezclas con cal, la capacidad de retención de agua del suelo en función de la afectación de su química se ve modificada al generar reducción en su IP a un

promedio de 5.3% (IP suelo natural 12.8%), observando también una relación directa proporcional entre el IP y la concentración de Cal.

- Se encontró que la capacidad de absorción de agua disminuye con la concentración de cal, la cual experimenta reducciones entre 66.9% - 80.7% aproximadamente al compararlos con los resultados encontrados con el suelo natural.
- Según la estimación de cal necesaria para estabilizar un suelo a partir de la medida del pH, encontramos para un pH de 12.40 una concentración de cal de 3.29%; que luego de evaluar un comportamiento a la compresión simple para concentraciones de 4.0% y 5.0% con resultados similares, se determinó una dosificación de trabajo con una concentración de cal hidratada del 4.0%.
- En lo que respecta a la resistencia de los materiales analizados, para las experiencias en suelos mezclados con cal al 3.0%, 4.0% y 5.0%, respectivamente se encontraron resultados de resistencia a la compresión simple con valores que oscilan entre 5.85 – 12.03 kg/cm², 6.86 – 14.31 kg/cm² y 6.26 – 19.11 kg/cm², y que comparados con los resultados para los suelos naturales que oscilan entre 2.06 – 4.08 kg/cm², podemos evidenciar incrementos considerables proporcionales a la concentración del mejorador.
- Para las mezclas con cal, los aportes en resistencia son significativos a edades de maduración superiores a 14 días, encontrando aportes de 3.5 kg/cm² por cada 1.0% de concentración del mejorador.
- Para los suelos estabilizados con cal con velocidades de onda entre 1039 – 1398m/s y con resistencias a la compresión simple entre 7.10-19.11kg/cm² (edades de curado entre 12 y 37 días) denotan incrementos considerables respecto de las propiedades mecánicas del material al tener como referencia las condiciones del suelo natural, el cual reporta velocidades de onda entre 722-1027m/s y resistencia a la compresión simple de 2.50-4.08kg/cm² (edades de curado entre 12 y 37 días).

- Resumido en la Tabla 6-12, podemos resaltar que la respuesta a las solicitaciones cíclicas a edades de curado a 7 y 14 días y concentraciones de trabajo para los materiales estabilizantes, frente a los resultados encontrados del módulo resiliente con suelo natural y presiones de confinamiento de 41.4kPa, 27.6kPa, 13.8kPa a diferentes esfuerzos desviadores, reportan incrementos máximos del módulo resiliente para las mezclas con cal al 4.0% entre 16.6% - 31.2%. Con comportamiento similar y con una misma tendencia, podemos encontrar los incrementos de esfuerzos axiales confinados máximos para las concentraciones de cal al 4.0% con resultados del 25.1%.
- Para el suelo + cal 4.0% con edades de curado de 7 y 14 días, se describe un comportamiento de incremento del módulo resiliente - M_r frente al esfuerzo desviador - σ_a aplicado, los cuales a su vez se incrementan con la presión de cámara. Para los diferentes estados de presión de cámara y esfuerzo desviador durante el número de aplicaciones de carga de la prueba, se encuentran resultados de módulos resilientes para 7 días entre 28.44 - 91.91Mpa y a 14 días entre 30.08 - 77.55MPa, sin aportes representativos en los valores máximos. Para 7 y 14 días, con presiones de cámara de 13.8 y 27.6kPa, la edad de curado no genera cambios considerables en el módulo resiliente respectivo para los diferentes esfuerzos desviadores.
- Mediante una prueba rápida de corte aplicando una presión de cámara de 27.6kPa, la prueba de módulo resiliente permitió obtener resultados de carga axial máxima resistente del suelo bajo condiciones de confinamiento, reportaron valores a 14 días de curado para mezclas de suelo + cal al 4.0% resultados de 917kPa (9.17kg/cm²).
- **Suelo mejorado con cemento**
 - Se define como un segundo estabilizante al cemento portland en concentraciones de 3.0%, 5.0% y 7.0%. Para la evaluación de las propiedades mecánicas se realizan pruebas de ensayos a edades aproximadas de maduración de 3, 7, 14 y 30 días.

- La capacidad de retención de agua se analizó mediante pruebas de eficacia hidráulica (absorción y succión) la cual estableció que la química que aporta el cemento al suelo genera mayor capacidad de energía para la atracción y retención de las moléculas de agua, por ende, una mayor succión. Deduciendo así, que las mezclas con cal son más hidrófobas que las mezclas con cemento.
- La retención de agua para los suelos mezclados con cemento en concentraciones menores a 5.0% evidencian una reducción en la succión entre el 40.8% - 69.5%, en concentraciones del 7.0% la succión de agua se incrementa hasta un 2.8%.
- Para las mezclas con cemento, la capacidad de retención de agua del suelo en función de la afectación de su química se ve modificada al generar reducción en su IP a un promedio de 7.2% (Observando una condición poco variable del IP con el incremento de concentración del estabilizador). Concluyendo que la mayor reducción en el índice de plasticidad se ve generado al mezclar los suelos con cal, igual la mayor afectación con la máxima reducción del pH del suelo.
- Para las mezclas con cemento y sus diferentes concentraciones analizadas (3.0%, 5.0% y 7.0%), bajo el criterio de durabilidad y resistencia, se reportan valores de resistencia a la compresión simple a 7 días en un rango de 2.10MPa a 4.50MPa ($21.0 - 45.0 \text{ kg/cm}^2$), determinando así con ayuda de la regresión lineal, para una resistencia a la compresión simple de 21.0 kg/cm^2 una concentración de trabajo de 3.60%.
- Para la experiencia en suelos mezclados con cemento al 3.0%, 5.0% y 7.0%, respectivamente se encontraron resultados de resistencia a la compresión simple con valores que oscilan entre $14.37 - 30.82 \text{ kg/cm}^2$, $22.60 - 56.88 \text{ kg/cm}^2$, $28.99 - 57.15 \text{ kg/cm}^2$. Para las mezclas con cemento, por cada 1.0% de concentración del mejorador, genera rendimiento de 3.7 kg/cm^2 a partir de los 3 días de maduración, 5.2 kg/cm^2 a partir de los 7 días y encontrando situaciones que oscila entre $6.5 - 6.6 \text{ kg/cm}^2$ a edades entre 15 y 37 días. Diferenciando entonces una mayor actividad química con mejoras en las propiedades mecánicas del material desde muy tempranas edades, a diferencia de la cal (resistencia significativos a edades

de maduración superiores a 14 días con aportes de 3.5 kg/cm^2 por cada 1.0% de concentración del mejorador).

- Los suelos estabilizados con cemento, con velocidades de onda entre 1821-2278m/s y resistencia a la compresión simple entre $23.38\text{-}57.15\text{kg/cm}^2$, presentan un incremento superior que el mostrado con los estabilizados con cal (velocidades de onda entre 722-1027m/s y resistencia a la compresión simple de $2.50\text{-}4.08\text{kg/cm}^2$), al tener como referencia la situación que describen los suelos naturales.
- Resumido en la Tabla 6-12, podemos también resaltar que la respuesta a las sollicitaciones cíclicas a edades de curado a 7 y 14 días y concentraciones de trabajo para los materiales estabilizantes, frente a los resultados encontrados del módulo resiliente con suelo natural y presiones de confinamiento de 41.4kPa, 27.6kPa, 13.8kPa a diferentes esfuerzos desviadores, reportan incrementos máximos del módulo resiliente para mezclas con cemento al 3.6%, entre el 53.6% - 75.6%. Con comportamiento similar y con una misma tendencia, podemos encontrar los incrementos de esfuerzos axiales confinados máximos para las concentraciones de cemento al 3.6% con resultados del 180.3%.
- Para el suelo + cemento 3.6% con edades de curado de 7 y 14 días, se experimenta un comportamiento de incremento del módulo resiliente - M_r frente al esfuerzo desviador - σ_a aplicado, los cuales a su vez se incrementan con la presión de cámara. Para los diferentes estados de presión de cámara y esfuerzo desviador durante el número de aplicaciones de carga de la prueba, se encuentran resultados de módulos resilientes para 7 días entre 36.05 – 94.61Mpa y a 14 días entre 35.09 – 116.80MPa, encontrando aumento de resistencia con la edad de curado. Para 7 y 14 días, con presiones de cámara de 41.4, 13.8 y 27.6kPa, la edad de curado genera incrementos en el módulo resiliente respectivo para los diferentes esfuerzos desviadores.
- Mediante una prueba rápida de corte aplicando una presión de cámara de 27.6kPa, la prueba de módulo resiliente permitió obtener resultados de carga axial máxima resistente del suelo bajo condiciones de confinamiento, reportaron valores para

mezclas con cemento al 3.6% a 14 días de curado resultados de 2055kPa (20.55kg/cm²). Encontrando valores superiores en un 24% relativos a los reportados por los suelos mezclados con cal y del 80% con respecto al suelo en estado natural.

▪ **Generales**

Finalmente, y por los resultados anteriores, tanto en respuesta a cargas monotónicas como cíclicas, podemos denotar un mejor comportamiento para las resistencias en las mezclas con cemento. Aun cuando es importante resaltar las reducciones en el índice de plasticidad, la mayor afectación del pH del suelo y los beneficios en las propiedades hidrófobas que las mezclas con cal demostraron en la presente experiencia.

En consecuencia, se observó que tanto la cal como el cemento aportan mejoras a las propiedades mecánicas del suelo en condición natural. No obstante, es preciso destacar las siguientes particularidades como contribución de cada uno de los modificadores, las cuales serán de utilidad en la decisión de la implementación para un proceso constructivo:

- Las mezclas con cal son más hidrófobas que las mezclas con cemento, revelando un mejor comportamiento frente a los periodos húmedos prolongados en el departamento del vichada.
- La mayor reducción en el índice de plasticidad se ve generado al mezclar los suelos con cal, igual que una mayor reducción del pH del suelo. Situación que permite mayor manejabilidad del material en los procesos constructivos y de eficacia en tiempo en la reducción de humedad para las actividades de compactación y/o densificación.
- Para ambos tipos de mezclas, cemento y cal, se describen incrementos en resistencia con el aumento de concentración del material estabilizante. Diferenciando, una mayor actividad química con mejoras en las propiedades mecánicas del material mezclado con cemento desde muy tempranas edades, a diferencia de lo ocurrido con la cal donde los aportes en resistencia son significativos a edades de maduración superiores a 14 días.

- La rigidez de los materiales se ve reflejada con los incrementos en las velocidades de onda, siendo consecuente las mayores rigideces para las mezclas con el cemento y por ende su velocidad de onda.
- En consideración a las concentraciones de trabajo encontradas en la presente experiencia para el tipo de suelo analizado (mezclas con cal 4.0% y con cemento del 3.6%) y la relación de costos de estabilizante por tonelada de material seco: \$ cal hidratada / \$ cemento portland = \$ 44.653 / \$ 16.492 = 2.71 aproximadamente, año 2019), es necesario considerar los beneficios hidrófobos y de manejabilidad que presenta la cal frente a las condiciones climáticas de la zona junto con los aportes en resistencia a las propiedades mecánicas del material. Por lo anterior, podemos encontrar en la cal una alternativa viable de aplicación como mejoramiento del suelo.

Tabla 7-1. Costo unitario estabilizantes (Año 2019). (Elaboración propia)

	Unidad	Costo promedio / unidad (Año 2019)
Cemento uso general	kg	\$458
Cal hidratada	kg	\$1.116

	Concentración	Costo
Suelo Seco (kg)	96,0%	
Cal Hidratada (kg)	4,0%	\$ 44.653,33
	100,0%	
	Concentración	Costo
Suelo Seco (kg)	96,4%	
Cemento Portland (kg)	3,6%	\$ 16.492,24
	100,0%	

7.2 Recomendaciones

- Con el fin de evaluar situaciones de anisotropía, succión, contenidos de humedad y peso unitario de los materiales, se propone estudiar bajo estas diferentes condiciones, la resistencia del suelo objeto de estudio y su mejoramiento con mezclas de cal y cemento, las respuestas bajo cargas dinámicas y estáticas.
- Se recomienda evaluar para edades de curado superiores a las implementadas en la presente experiencia, las propiedades de los materiales; en aras de definir los tiempos

para los culés el cementante (cal ó cemento) deja de aportar propiedades significativas a las mezclas.

- Dado los aportes de resistencia que ofrece el cemento en las mezclas con el suelo estudiado y los beneficios notorios que presentan las mezclas con cal hidratada en lo referido a reducción de índice de plasticidad, aumento en el potencial de hidrogeno – pH y los beneficios en las propiedades hidrófobas, es oportuno estudiar combinaciones de Suelo + Cal + Cemento en concentraciones óptimas para mejorar los suelos del sector.

8. Bibliografía

- A, Clerici. (1992). *Engineering geological characterization of weak rocks: classification, sampling and testing*. In: *ISRM Symposium Eurock*.
- A, Ochoa Y.; P, Ríos B.; A, Cardozo O.; J, Cubides T.; D, Giraldo B.; H, Rincón C.; D, Mendivelso. (s.f.). *CARTOGRAFIA GEOLOGICA Y MUESTREO GEOQUIMICO DE LAS PLANCHAS 159, 160, 161, 179, 180 Y 181 PUERTO CARREÑO, VICHADA. MEMORIA EXPLICATIVA. SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO*.
- AASHTO. (1993). *Guide for Design of Paviment Structures*.
- Alcaldía de la Primavera. (7 de Marzo de 2018). *Alcaldía de la Primavera*. Recuperado el 17 de Octubre de 2018, de <http://www.laprimavera-vichada.gov.co/municipio/nuestro-municipio>
- ASTM D 5777. (2000). *Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation D 5777 – 00*.
- Caballero, O. (s.f.). 2.2.3 *Estabilización química con silicato de sodio del material de préstamo de la vía La Primavera – Bonanza – La Venturosa en el departamento del Vichada*.
- Caballero, O. J. (2017). *Estabilización química con silicato de sodio del material de préstamo de la vía La Primavera – Bonanza – La Venturosa en el departamento del Vichada*.
- Carlos Jofre, C. K. (2003). *Manuel de estabilización de suelos con cemento o cal*.
- DROMOS-CEIBA, P. (2015). *Materiales y métodos constructivos para la estabilización de la malla vial en Colombia: una visión eficiente, económica y sostenible. Departamento del Vichada*.
- G., Russo. (1994). *Some considerations on the applicability of major geomechanical classifications to weak and complex rocks in tunnelling. Geoingegneria Ambientale e Mineraria*.

- Hui Zhou a, *. C. (2014). *Analysis of mechanical behavior of soft rocks and stability control in deep tunnels. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.*
- Instituto Nacional de Vías - INVIAS. (2013). Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Normas de Ensayo.
- INVIAS. (2013). Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Normas de Ensayo.
- J.H.S. Kung, H-D. Lin, S. – J. Yang and W. – H. Huang. (2016). resilient Modulus and Plastic Strain of Unsaturated cohesive subgrade Soils. *Unsatrated Soils.*
- Lekarp, F. I. (2000). Resilient response of Unbound Aggregates. *Journal of Transportation Engineering.*
- Mallela, J. H. (2004). *Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design.*
- MEPDG. (2004). Guide for the mechanistic - Empirical Design of New and rehabilitated Pavement Structures. *Transportation Research Board.*
- Ministerio de Transporte. (01 de Diciembre de 2017). *Red Vial Departamento del Vichada.* Recuperado el 23 de Septiembre de 2018
- Ortega. (1994). *Consideraciones generales para interpretar análisis químicos de suelos.* Bogota: IGAC. 1994.
- Rondón et. al. (2012). *Comportamiento resiliente de materiales finogranulares en subrasantes.*
- S. R. Yang, H. D., Lin, J.H.S. Kung and W.-H. Huang. (2008). Suction-Controlled Laboratory Test on Resilient Modulus of Unsaturated Compacted Subgrade Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenviron.*
- S.R. Yang, W. H. Huang and Y. – T. Tai. (1913). Variation of Resilient Modulus with Soil Succion for Compacted Subgrade Soils. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Researcha Board.*
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte. (2001). *MODULOS DE RESILIENCIA EN SUELOS FINOS Y MATERIALES GRANULARES.*
- Servicio Geológico Colombiano. (2014). *CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA Y MUESTREO GEOQUÍMICO DE LAS PLANCHAS 197 Y 198 DEPARTAMENTO DE VICHADA.* Servicio Geológico Colombiano. Recuperado el 2 de Octubre de 2018, de http://srvags.sgc.gov.co/Flexviewer/Estado_Cartografia_Geologica/

Skempton, A. W. (1953). *The collodial "activity" of clays*. Zurich.

Sociedad Colombiana de Geología, Geología NorAndina. (1983). *CONTRIBUCIÓN A LA GEOLOGÍA DEL ORIENTE DE LA COMISARÍA DEL VICHADA Y LA GUANÍA (COLOMBIA)*.

Some considerations on the applicability of major geomechanical classifications to weak and complex rocks in tunnelling. Geoingegneria Ambientale e Mineraria . (1994).

Soto, G. A. (2017). *Evaluación sobre el Uso de Cortes Tratados de Perforación Petrolera en la Construcción de Vías Terciarias*.

Trujillo, C. A. (s.f.). *Estado del arte estabilización química de suelos*.

A. Anexo: Normas particulares y/o pruebas de ensayos

- Resistencia a la penetración del suelo (I.N.V. E - 148).

Esta prueba determina un índice de resistencia de los suelos denominado relación de soporte de california C.B.R. (California Bearing Ratio).

- Uso del penetrómetro dinámico de cono en aplicaciones de pavimentos a poca profundidad (I.N.V. E - 172).

Prueba que permite relacionar los valores de resistencia *in-situ* (C.B.R.) de un suelo con los valores de penetración del penetrómetro dinámico de cono (PDC).

- Densidad del material (I.N.V. E - 146).

Determina experimentalmente la masa unitaria seca (densidad seca) de equilibrio y la humedad correspondiente. Genera indicación de las condiciones probables de trabajo de los suelos de subrasante bajo pavimentos asfálticos en servicio y pueden servir como base para establecer la resistencia.

- Granulometría (I.N.V. E - 213).

Determina cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de agregados gruesos y finos de un material.

- Humedad y límites de consistencia (I.N.V. E - 125 / 126).

Determinado mediante los ensayos de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad. El índice de plasticidad de un suelo es el tamaño del intervalo de contenido de agua, expresado como un porcentaje de la masa seca de suelo, dentro del cual el material está en un estado plástico.

- Material orgánico (I.N.V. E - 121).

Sirve para determinar la oxidación cuantitativa de materia orgánica en tales materiales y proporciona una estimación válida del contenido orgánico.

- Azul de metileno (I.N.V. E - 235).

Esta norma determinar la cantidad de material potencialmente dañino (incluyendo arcilla y material orgánico) presente en la fracción fina de un agregado. Se puede emplear para estimar la cantidad de arcillas dañinas y materia orgánica presente en un agregado. Un valor significativo indica una gran cantidad de arcilla o de materia orgánica presentes en la muestra.

- Equivalente de arena (I.N.V. E - 133).

Determina la proporción relativa del contenido de polvo fino nocivo, o material arcilloso, en los suelos o agregados finos. Este ensayo produce como resultado un valor empírico de la cantidad relativa, finura y carácter del material arcilloso presente en la muestra de suelo o agregado fino.

- Expansión (I.N.V. E - 127 / 132).

Tienen como propósito obtener datos por medio de los cuales se pueden calcular las siguientes constantes de los suelos: a) límite de contracción, b) relación de contracción, c) cambio de volumen, d) contracción lineal. El concepto del límite de contracción se puede emplear para evaluar el potencial de contracción, es decir, la posibilidad que se desarrollen grietas en obras que incluyen suelos cohesivos. Determinan si un suelo es potencialmente expansivo, así como a los métodos para predecir la magnitud del hinchamiento que se pueda producir.

- Módulo resiliente (I.N.V. E - 156).

Proporciona la relación básica constitutiva entre esfuerzo y deformación de los materiales de construcción de pavimentos flexibles para su empleo en el análisis del sistema de capas en pavimentos. También proporciona un medio de evaluación de los materiales de construcción de pavimentos, incluyendo suelos de subrasante, bajo una variedad de condiciones ambientales y de estado de esfuerzos, que simulen realísticamente las situaciones existentes en pavimentos sometidos a cargas móviles del tránsito.



Figura 8-1. Montaje prueba módulo resiliente. (Elaboración propia)

- Eficacia hidráulica.

El método consiste en someter probetas de 5.0cm de diámetro y 10.0cm de altura (o fracción de estas), a un estado de saturación por capilaridad. Las probetas son llevadas a un recipiente con profundidad de tres centímetros de agua, hasta que el sistema se estabilice, es decir que no permita la entrada de agua. Para lo cual se realiza un control mediante pesajes consecutivos en diferentes periodos de tiempo, obteniendo así, la absorción de agua y la succión de dicho liquido por el área expuesta.

Se debe de garantizar que la probeta tenga absorción de agua únicamente por el área circular inferior, lo cual se logra con ayuda de cinta adhesiva, papel contact o vinipel.



Figura 8-2. Probeta prueba de eficacia hidráulica. (Elaboración propia)



Figura 8-3. Protección y rotulado de probetas. (Elaboración propia)

- Potencial de hidrógeno (pH).

Se determina en mezclas de suelo : agua (utilizando 25g de suelo seco al horno y 100mL de agua destilada contenidas en un recipiente plástico) diferentes concentraciones de cal, al 1.0%, 2.0%, 3.0%, 4.0%, 5.0%, 6.0%, 7.0%, 8.0%, 9.0%, 10.0% y una situación de solución saturada, la cual se agitada en cada recipiente debidamente rotulado durante un minuto cada 5 minutos hasta completar 30 minutos y posteriormente, con la ayuda de un equipo medidor de potencial de hidrógeno se establece el pH agitando vigorosamente con varilla de vidrio hasta formar una suspensión, antes de realizar la medida.



Figura 8-4. Determinación del Potencial de hidrógeno (pH). (Elaboración propia)



Figura 8-5. Determinación del Potencial de hidrógeno (pH). (Elaboración propia)



Figura 8-6. Determinación del Potencial de hidrógeno (pH). (Elaboración propia)



Figura 8-7. Determinación del Potencial de hidrógeno (pH). (Elaboración propia)

▪ Fabricación de Probetas y compresión simple.

El objetivo de la prueba consiste en elaborar muestras (probetas) en laboratorio de 5.0cm de diámetro y 10.0cm de longitud, bajo condiciones de densidad y humedad determinadas por el ensayo de proctor modificado.

Se describen a continuación los lineamientos definidos para dicho proceso:

a) Preparación de la muestra:

- Los especímenes deben de tener 5.0cm de diámetro y 10.0cm de altura, la relación de altura/diámetro debe de ser de 2.
- La muestra se debe preparar con un contenido de agua (según la humedad del material al momento del mezclado) y cantidad de material adecuado para obtener una densidad prescrita. La muestra debe ser disgregada, de ser necesario (sin alterar su granulometría), y mezclada de manera homogénea al momento de agregar cualquier modificador según la dosificación preestablecida.



Figura 8-8. Preparación de la muestra. (Elaboración propia)

b) Compactación de la muestra (Probeta):

- Previo a la preparación de la muestra, se debe tener dispuestos el molde, pistón de compactación y demás elementos que hacen parte de dicho equipo además del aparato de carga (Versa Tester) con el cual se realizara dicho proceso.



Figura 8-9. Molde de compactación. (Elaboración propia)



Figura 8-10. Pistón de compactación. (Elaboración propia)



Figura 8-11. Montaje equipo de carga. (Elaboración propia)

- El procedimiento de compactación se realiza en 5 (cinco) capas de aproximadamente 2.0cm de espesor compacto. Controlando con ayuda de deformímetros los espesores definidos.



Figura 8-12. Deformímetro para control de espesores. (Elaboración propia)



Figura 8-13. Conformación de capas. (Elaboración propia)

- Para cada una de las capas, aplicar carga por medio del aparato de carga a velocidad, controlando los espesores definidos en el del numeral anterior.
- Para cada una de las capas, luego de su compactación y antes del inicio de la conformación de la siguiente capa, escarificar la superficie superior con la ayuda de una pinta metálica fina (ranurador).



Figura 8-14. Ranurador de punta metálica fina. (Elaboración propia)

- Luego de la conformación de las capas y con la ayuda de un extractor o método de extracción adecuado, se retirar la muestra (probeta) del molde y se registra su peso y dimensiones. Se determina la altura y diámetros promedios, mediante la toma de tres datos por cada dimensión.
- Se procede a rotular la muestra y a depositarla en el cuarto húmedo y condiciones controladas.



Figura 8-15. Probeta. (Elaboración propia)

- Luego de la conformación de cada una de las probetas, estas son dispuesta en un curto de curado con un control de humedad relativa, debidamente rotuladas y protegidas a la pérdida de humedad, con el fin de ser conservadas con los mínimos cambios a las condiciones para las cuales fueron elaboradas. Esto durante un periodo de maduración específico para el desarrollo del trabajo.



Figura 8-16. Protección y rotulado de probetas. (Elaboración propia)

- Para el material utilizado, se le realiza pruebas de pH, humedad y límites de consistencia.
- c) Compresión simple.
- Aplica lo establecido en el numeral 6 “Procedimiento” de la Norma I.N.V. E – 152 “Compresión Inconfinada en Muestras de Suelo”.



Figura 8-17. Máquina Universal de Ensayos (Marca Shimadzu). (Elaboración propia)

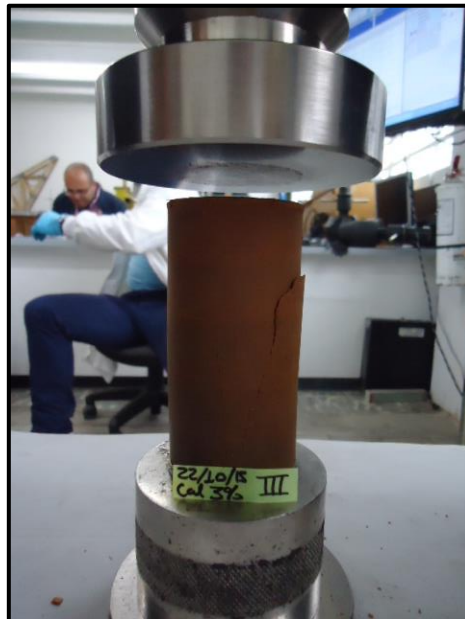


Figura 8-18. Compresión Simple. (Elaboración propia)

▪ Velocidad de onda.

Con la ayuda de un equipo de Ultrasonido “*Pundit Lab*”, conocimiento previamente su estado y respectiva calibración, se procede a determinar las velocidades de onda de los especímenes elaborados (Probetas) luego de su curado y condiciones de maduración definidas:

- Ajustar en el equipo, la longitud de recorrido del espécimen, la cual corresponde a la altura promedio de la probeta.
- Asegurar un buen acoplamiento de los transductores sobre las superficies de la probeta. Un material viscoso (vaselina, gelatina soluble en agua, etc.) puede mejorar de una forma eficiente la transferencia de energía entre las superficies. La función del agente de acoplamiento es eliminar aire entre las superficies de contacto de los transductores y espécimen.
- Aplicado el acoplador a los transductores y las superficies del espécimen, se procede a disponer los transductores de una forma directa sobre las superficies del espécimen, procurando mantener una alineación adecuada hasta que la lectura se defina. Se deberá procurar no mover los transductores y el espécimen, ya que se puede generar ruido y consecuentemente lecturas erróneas.
- Proceder con la toma de la lectura, velocidad de pulso. Según dato del equipo, los mejores resultados se obtendrán si el nivel de la señal recibida se encuentra alrededor del 75%.

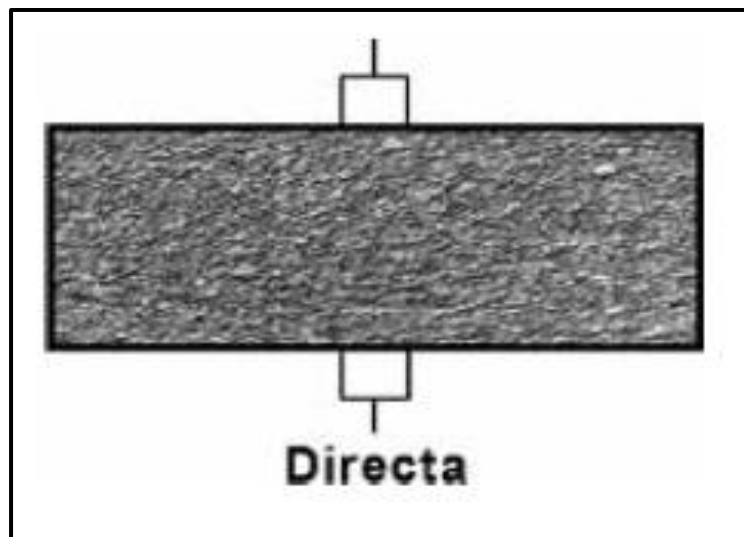


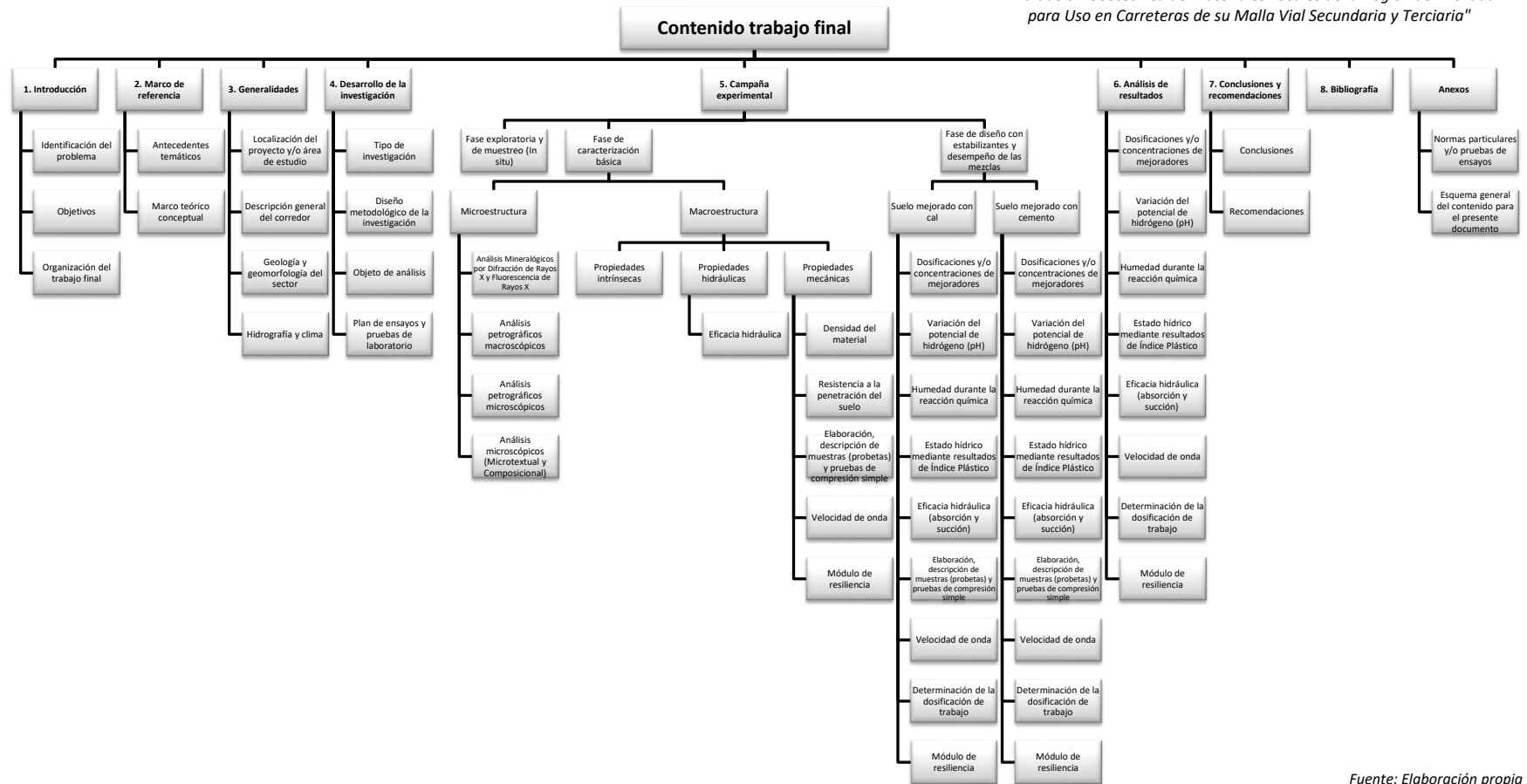
Figura 8-19. Disposición de transductores. (Elaboración propia)



Figura 8-20. Equipo de Ultrasonido "Pundit Lab". (Elaboración propia)

B. Anexo: Esquema general del contenido para el presente documento.

*"Evaluación Geotécnica de Materiales Locales de la Región del Vichada
para Uso en Carreteras de su Malla Vial Secundaria y Terciaria"*



Fuente: Elaboración propia